

УДК 621.396:621.391.037

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕРЫ СХОЖЕСТИ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ ЗАКЛАДНЫХ УСТРОЙСТВ

В.М. ЧЕРТКОВ, д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены основные алгоритмы и методы определения меры сходства изображений. Даны общая характеристика и требование к мерам, вычисляющим сходство. Приведены функции схожести корреляционного типа. Описан процесс формирования идентификационного изображения. Представлена блок-схема модели исследования меры сходства степенных полиномов. Приведены результаты вычислительного эксперимента метрических функций с целью определения наилучшей метрики под решение поставленной задачи, а также определения по вычислительным характеристикам и точности меры сходства полиномов третьего порядка.

Ключевые слова: *нелинейный радиолокатор, идентификационный образ, закладное устройство.*

Введение. Мера сходства играет ключевую роль при формировании классификации изучаемого множества объектов и при распознавании принадлежности объектов к тому или иному классу. Специфика этих задач состоит в том, что мера сходства здесь является величиной относительной, она зависит не только от сходства объекта с определенным классом, но и от его сходства с другими классами. Актуальность темы обусловлена решением проблемы определения меры сходства идентификационных образов (сложных множеств) закладных устройств, полученных нелинейным радиолокатором при обследовании помещений в условиях неполной исходной информации и при воздействии шумовых факторов.

Разработка новых алгоритмов нахождения меры схожести идентификационных образов для современной науки и техники является актуальной задачей. Она играет важную роль в научных исследованиях по защите информации и информационной безопасности, обработке космических изображений, других отраслях деятельности человека [1] и направлена в первую очередь на исследование метрических характеристик и сравнение функций между собой в условиях неполной исходной информации и внешних негативных воздействий.

Оценка сходства идентификационных образов подобна оценке сходства изображений. Выбранная функция схожести должна удовлетворять некоторым требованиям, и ее свойства должны быть известны. В качестве функции схожести может использоваться мера расстояния либо функция схожести. Если два изображения абсолютно идентичны, то мера расстояния M между ними равна 0, а нормализованная функция схожести R равна 1, следовательно, $M = 1 - R$ или $R = 1 - M$ [2].

Совокупность требований, которым удовлетворяет некоторая мера сходства M , определяет более строгую либо слабую (на качественном уровне) оценку сходства. Мера является строгой, если она удовлетворяет большинству предъявляемых требований, и слабой – если она не удовлетворяет нескольким требованиям [3].

Формирование идентификационного образа закладного устройства. При обследовании помещений нелинейным радиолокатором формируют идентификационный образ предполагаемого закладного устройства, согласно методике, представленной в [4].

Формирование идентификационного образа сводится к следующему алгоритму действий:

- обнаружение нелинейного объекта по наличию отклика на второй и третьей гармониках переизлученного зондирующего сигнала;
- определение необходимого уровня излучения для более качественного приема и регистрации данных. На данном этапе происходит регулирование мощности излучения и соответствующего ему оптимального расстояния до объекта;
- получение вида нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) на основе разработанного алгоритма, который по измеренным значениям уровней комбинационных гармоник определяет коэффициенты аппроксимирующего полинома [5];
- с помощью датчика гироскопа происходит смена угла облучения по азимуту на 1–5 град (дискретность может варьироваться) и производится повторное получение ВАХ;
- по достижении 360 град, т.е. полного круга азимута, происходит смена угла места на 1–5 град и повторяется весь цикл измерений по азимуту.

В результате полученные данные можно представить в виде трех графиков для каждого коэффициента полинома, аппроксимирующего ВАХ нелинейного объекта, которые и будут составлять идентификационный образ предполагаемого закладного устройства. По осям X и Y графика будут отложены соответственно градусы угла азимута и угла места, а по оси Z – значение квадратичного либо кубического, либо линейного коэффициента в разгах для каждого из трех графиков.

Основная часть. Для разработки алгоритма определения степени подобия идентификационных образов на основе оценки меры сходства степенных полиномов проведем анализ функций схожести корреляционного типа. Для сравнения двух идентификационных образов $O = \{o_{ij}\}$ и $B^* = \{b_{ij}^*\}$ выберем следующие типы функций схожести [6, 7].

1. Нормированная усредненная функция корреляции:

$$R^{COR} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (o_{ij} - \bar{o})(b_{ij}^* - \bar{b}^*)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (o_{ij} - \bar{o})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (b_{ij}^* - \bar{b}^*)^2}}, \quad (1.7)$$

где \bar{o} и \bar{b}^* – средние значения изображений o и b^* соответственно.

2. Функция на основе суммы квадратов разностей

$$R^{SSD} = 1 - \frac{1}{LN^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (a_{ij} - b_{ij}^*)^2, \quad (1.8)$$

где L – диапазон допустимых значений яркости.

3. Функция на основе метрики Хаусдорфа

$$R^H = 1 - \frac{1}{L} \max_{ij} |a_{ij} - b_{ij}^*|, \quad (1.9)$$

где $i \in 0 \dots N-1, j \in 0 \dots N-1$ – диапазон допустимых значений яркости.

4. Функция на основе городской метрики

$$R^C = 1 - \frac{1}{LN^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |a_{ij} - b_{ij}^*|. \quad (1.10)$$

5. Функция на основе среднеквадратичной погрешности

$$R^e = 1 - \frac{1}{LN^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (a_{ij} - b_{ij}^*)^2}. \quad (1.11)$$

Модель исследования меры сходства идентификационных образов. В ходе разработки алгоритма нахождения меры сходства идентификационных образов была разработана имитационная модель, представленная на рисунке 1.

Модель состоит из блоков, которые описывают следующие функции:

- 1) эталонный полином – генерируется эталонный полином;
- 2) множество полиномов и их коэффициентов – формируется множество значений полиномов и их коэффициентов при воздействии на него нормального закона распределения величин;
- 3) расчет метрик по коэффициентам полиномов – подставляются основные расчетные метрические функции, такие как метрика Хаусдорфа, метрика среднеквадратичного отклонения, нормированная усредненная функция корреляции, метрика городских кварталов и производится расчет по коэффициентам полиномов;

- 4) расчет метрик по данным полиномов – рассчитываются метрики по данным значений полиномов, полученных в диапазоне от 0 до 1;
- 5) поиск минимального значения среди рассчитанных значений метрик – производится поиск минимального значения метрики из множества полученных значений;
- 6) анализ результатов – осуществляется расчет значений для каждой метрики, выходные данные блока выводятся в виде графиков.

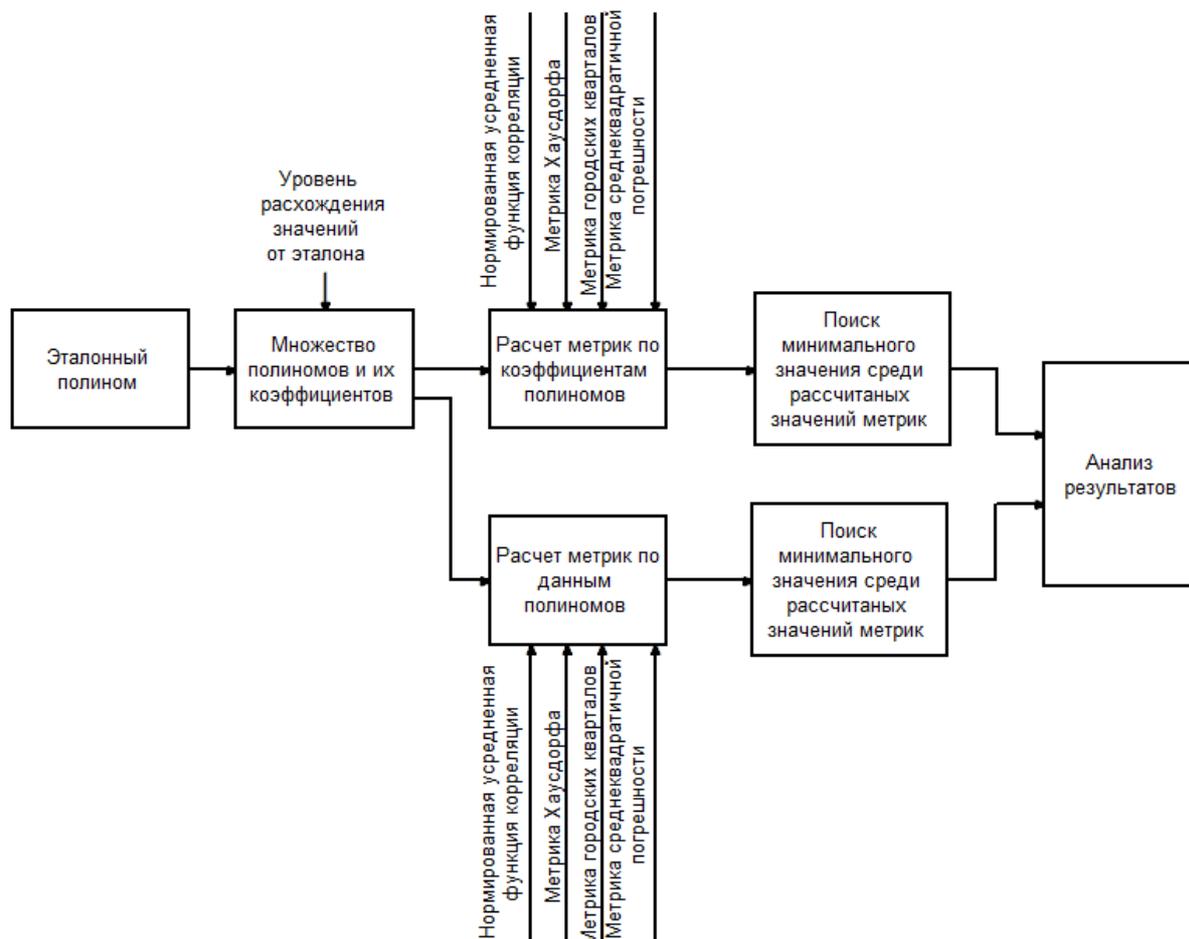


Рисунок 1. – Структура имитационной модели исследования меры сходства степенных полиномов

Результаты вычислительного эксперимента. Проведение вычислительного эксперимента сравнения коэффициента корреляции и метрических функций между собой обосновано нахождением наилучшего результата в определении меры схожести по коэффициентам полинома либо по его данным, определением наилучшей функции для алгоритма установления меры схожести идентификационных образов закладных устройств [8].

При проведении экспериментов по оценке меры схожести полиномов задавался эталонный полином со своими коэффициентами и генерировались полиномы с измененными коэффициентами относительно эталона по нормальному закону распределения.

Результаты моделирования функции схожести полиномов на основе метрики Хаусдорфа приведена на рисунке 2. Эталонный полином выделен красным цветом, значения его коэффициентов задавались перед началом проведения эксперимента. На основе функции по вычислению метрики Хаусдорфа из 100 сгенерированных полиномов найден самый близкий полином, согласно рассчитанной метрике, отмеченный синим цветом. Согласно любой метрической функции, чем ближе результат функции к 0, тем более схожи сравниваемые полиномы.

Следует отметить, что метрика Хаусдорфа рассчитывается только по значениям полиномов в точках от минус 1 до 1 с шагом дискретности 0,01.

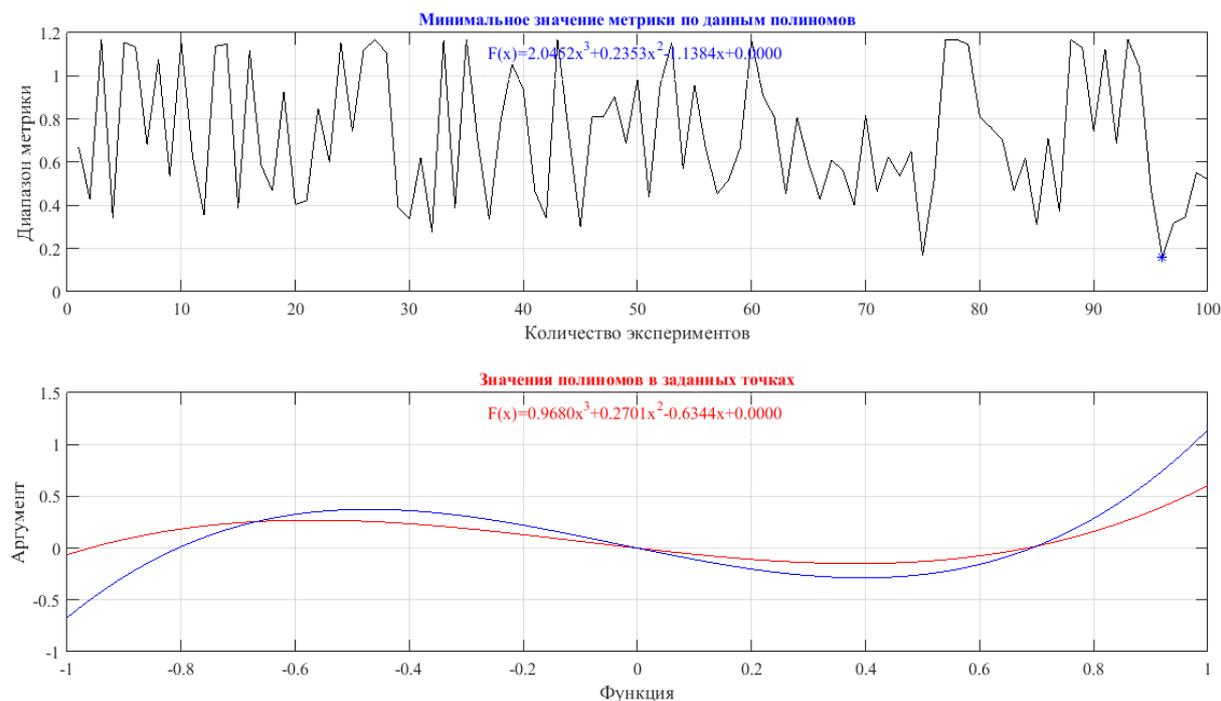


Рисунок 2. – Результаты моделирования функции Хаусдорфа

В ходе экспериментов было установлено, что с помощью функции Хаусдорфа определен самый схожий полином в 96 экспериментах из 100 проведенных.

В результате моделирования функции на базе среднеквадратичной погрешности установлен самый схожий полином в 84 экспериментах из 100 заданных.

При моделировании функции городской метрики отмечено, что самый схожий полином встречается на 78 экспериментах из 100 заданных.

Моделирование функции корреляции позволило установить, что самый схожий полином был найден на 61 эксперименте из 100 проведенных.

Особенность корреляции заключается в том, что ее коэффициент принимает значения от минус 1 до 1. При этом значение минус 1 говорит об отсутствии корреляции между величинами, 0 – о нулевой корреляции и 1 – о полной корреляции величин. Чем ближе значение коэффициента корреляции к 1, тем сильнее связь между двумя случайными величинами.

Вычислительный эксперимент и анализ полученных результатов показывают, что метрики среднеквадратичной погрешности и городской метрики по вычислительным результатам схожи и определяют одни и те же полиномы близкие к задаваемому эталону. Наилучшие показатели по поиску меры схожести по данным полиномов продемонстрировали метрики на основе среднеквадратичной погрешности и метрика на основе функции Хаусдорфа. Функция корреляции в эксперименте по поиску меры схожести по данным и коэффициентам не соответствует требованиям поставленной задачи ввиду большой погрешности определения сходства.

Установлено, что в качестве наиболее перспективного можно отметить метод нахождения меры схожести по коэффициентам полинома, так как по сравнению с методом расчета по данными он обладает на порядок более низкими вычислительными затратами. Для определения меры схожести по значениям полинома лучшие результаты показывает метрика Хаусдорфа, но эта функция ресурсоемкая для вычислений, что несомненно окажет негативное влияние при проектировании систем в реальном времени.

Алгоритм определения степени подобия. Для определения степени подобия идентификационных образов в среде MATLAB был разработан алгоритм, в котором выполняются последовательно следующие операции:

Операция 1. Генерация эталона идентификационного образа.

Генерируется трехмерная матрица размером $72 \times 72 \times 3$ пикселя со случайными значениями, которые распределены по нормальному закону.

Операция 2. Наложение белого шума.

Происходит наложение белого шума на эталонный образ с возможностью отдельного регулирования его уровня в децибелах для трех каналов матрицы идентификационного образа.

Операция 3. Генерирование тестового идентификационного образа.

Формируется тестовый идентификационный образ, который представляет фрагмент идентификационного эталонного портрета.

Операция 4. Наложения шумов на идентификационный портрет.

На сгенерированный идентификационный образ происходит наложение шумов.

Операция 5. Сравнение идентификационного образа.

Происходит перебор значений коэффициентов эталона идентификационного образа и сравнение с наложенным на него тестовым идентификационным образом.

Операция 6. Расчет метрик.

Рассчитываются метрики, на основании которых выполняется проверка схожести рассматриваемых коэффициентов, записанных в идентификационном образе.

Операция 8. Проверка превышения порога.

Проверка проводится посредством сравнения полученных значений метрик с установленным пороговым значением для каждой метрики в отдельности. При превышении установленного уровня для каждой метрики записывается единица в результирующую матрицу, иначе – ноль.

Операция 9. Расчет числового значения степени схожести идентификационных образов.

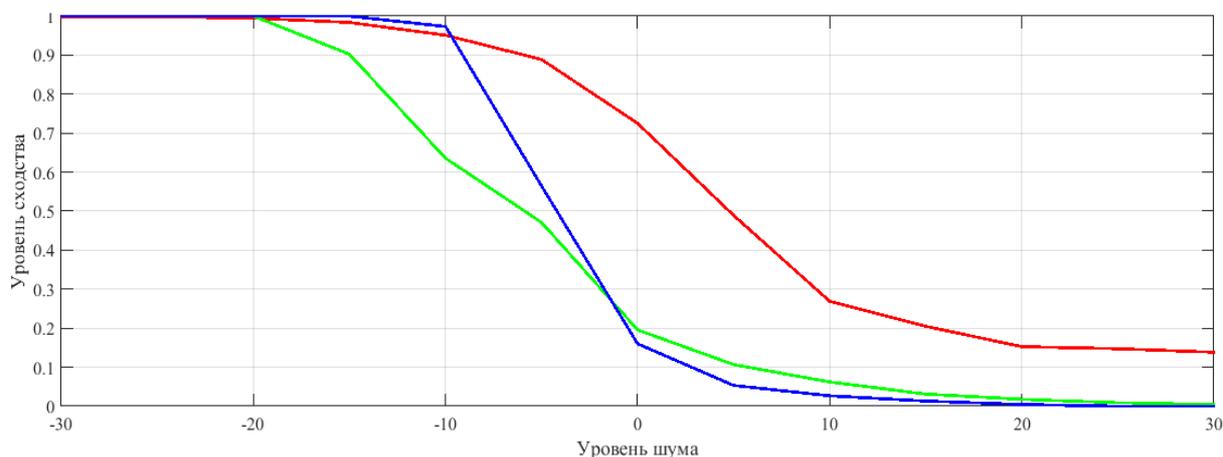
Расчет окончательного значения числовой меры схожести по каждой метрике выполняется путем подсчета единиц в результирующей матрице.

Операция 10. Вывод значений.

Процедура выводит данные эталона и идентификационного образа, а также графики нахождения меры схожести по каждой функции.

Влияние шума на вычисление меры сходства. Был проведен вычислительный эксперимент в ходе которого проверялась работоспособность алгоритма по определению численного значения схожести двух идентификационных образов. Вычислительный эксперимент выполнялся с тремя рассмотренными ранее метрическими функциями. В таблице 1 представлены зависимости трех метрик от шума в пределах от минус 30 дБ до плюс 30 дБ.

По результатам таблицы построены зависимости уровня сходства в зависимости от уровня шума, представленные на рисунке 3.



Синяя линия на графике – функция среднеквадратичной погрешности

Красная линия на графике – корреляционная функция

Зеленая линия на графике – функция Хаусдорфа

Рисунок 3. – Зависимость уровня сходства метрик от уровня шума

Условия неполной исходной информации. Одним из этапов проверки работоспособности алгоритма нахождения меры сходства идентификационных образов является проверка его в условиях неполной исходной информации. Под условиями неполной исходной информации подразумевается наложение на идентификационный эталонный образ нескольких одинаковых фрагментов, являющихся частью этого эталона.

Таблица 1. – Зависимость метрических функций от уровня шума

Уровень шума, дБ	Разность уровня схожести с шумом (метрика на основе среднеквадратичного отклонения)	Уровень схожести (метрика на основе среднеквадратичного отклонения)	Разность уровня схожести с шумом (метрика Хаусдорфа)	Уровень схожести (метрика Хаусдорфа)	Разность уровня схожести с шумом (метрика на основе корреляция)	Уровень схожести
-30	0,6667	1	0,6667	1	0,6663	0,9994
-25	0,6667	1	0,6667	1	0,6657	0,9985
-20	0,6667	1	0,6667	1	0,6632	0,9948
-15	0,6667	1	0,6015	0,9022	0,6559	0,9838
-10	0,6489	0,9733	0,4237	0,6356	0,6341	0,9511
-5	0,3763	0,5644	0,3141	0,4711	0,5926	0,8889
0	0,1067	0,16	0,1304	0,1956	0,4834	0,7251
5	0,0355	0,0533	0,0667	0,1067	0,3261	0,4891
10	0,0178	0,0267	0,0415	0,0622	0,1793	0,2689
15	0,0089	0,0133	0,0207	0,0311	0,1365	0,2049
20	0,0029	0,0044	0,0119	0,0178	0,1018	0,1527
25	0	0	0,0059	0,0089	0,09	0,1474
30	0	0	0,0029	0,0044	0,0893	0,1384

В первом случае нахождение меры схожести общий критерий сходства заключался в поиске наибольшего из пиков на результирующих графиках метрических функций, во втором случае – в расчете среднего значения всех пиков.

Для проведения исследования программой алгоритма генерируется идентификационный эталонный портрет 72×72 , который представлен на рисунке 4, и идентификационный портрет размером 18×18 на рисунке 5.

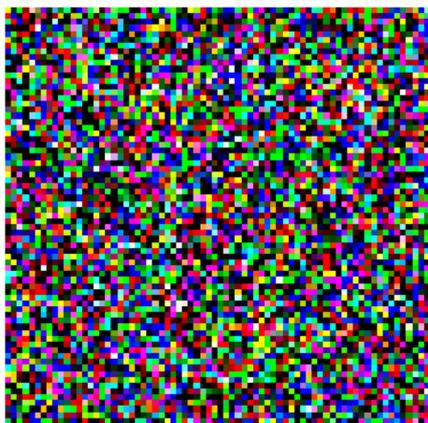


Рисунок 4. – Сгенерированный идентификационный эталонный портрет 72×72

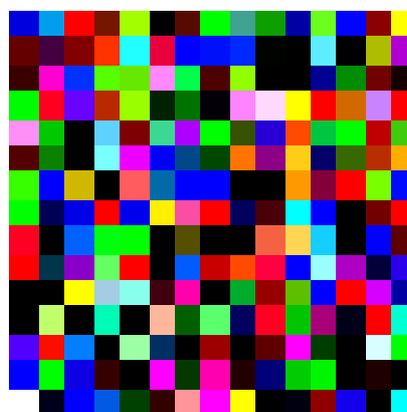


Рисунок 5. – Сгенерированный идентификационный портрет 18×18

Вычислительный эксперимент проводился в условиях наложения (вычисления среднего значения для каждого пикселя) на эталонный идентификационный образ в разных местах расположения трех тестовых идентификационных образов, обработанных шумами с задаваемым уровнем.

Первый этап исследования работы алгоритма при наложении на идентификационный эталон трех образов при уровне зашумления минус 30 дБ соответственно для каждого расположения. График результатов работы алгоритма поиска и определения значения сходства на основе корреляционной функции представлен на рисунке 6.

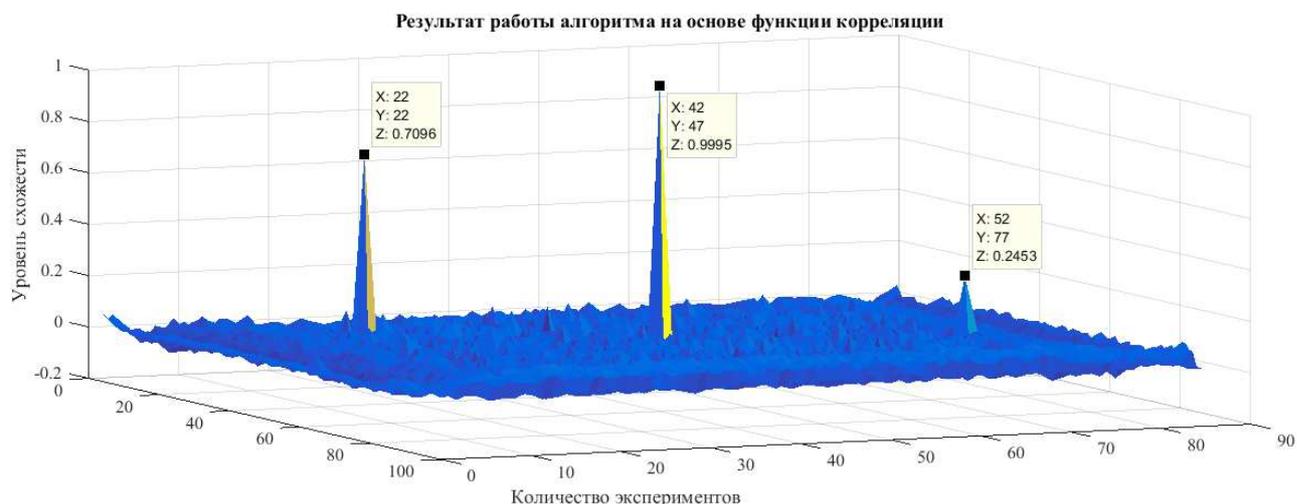


Рисунок 6. – График работы алгоритма в условиях не полной исходной информации

В результате проведенных исследований выявлено, что при зашумлении идентификационного образа шумами на уровне минус 30 дБ для каждого располагаемого фрагмента, уровень схожести его на эталоне составляет 0,9995, исходя из максимального значения пика функции, и 0,6514 – если считать коэффициент схожести равным среднему значению по трем пикам.

В таблице 2 представлены результаты эксперимента по вычислению значения меры схожести идентификационных портретов в условиях неполной исходной информации для различных метрик в зависимости от задаваемого уровня шума.

Таблица 2. – Результаты вычислительного эксперимента

Уровень шума, дБ	Функция корреляции		Метрика Хаусдорфа		Метрика среднеквадратичной погрешности	
	максимальное значение пика	среднее значение по трем пикам	максимальное значение пика	среднее значение по трем пикам	максимальное значение пика	среднее значение по трем пикам
-30	0,9995	0,6514	0,2623	0,2499	0,6281	0,6378
-15	0,9854	0,6156	0,2901	0,2479	0,6204	0,6039
-5	0,8707	0,5544	0,2562	0,2212	0,5741	0,5329

Заключение. В ходе анализа результатов установлено, что метрические функции Хаусдорфа и среднеквадратичной погрешности наиболее перспективны для использования в реализованном алгоритме вычисления меры схожести идентификационных образов. Составлена таблица зависимости метрических функций от уровня шума, на основании ее построены две зависимости рассчитанных числовых значений степеней подобию от воздействия шума на идентификационные образы. Результаты исследования работы алгоритма в условиях неполной исходной информации и определение степеней подобию неполного идентификационного образа позволили установить пороговое значение для метрики Хаусдорфа и метрики среднеквадратичной погрешности для принятия решения о схожести двух полиномов третьей степени. Кроме того, следует отметить, что в условиях неполной исходной информации хорошие результаты получены при применении алгоритмов на основе функции среднеквадратичной погрешности и на основе метрики Хаусдорфа, хотя последний при работе требует больших вычислительных затрат, что при реализации на аппаратном уровне может привести к уменьшению быстродействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борискевич А.А, Защита контента изображений на основе частотного полухрупкого маркирования // А.А. Борискевич, О.Л. Киндеева // Специальная техника. – 2012. – № 1. – С. 7–16.
2. Богуш, Р.П. Цифровая обработка сигналов и изображений : учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-40 02 01 «Вычислительные машины, системы и сети» / Р.П. Богуш, В.М. Черков. – Новополоцк : Полоцкий государственный университет, 2009. – 320 с.
3. Абламейко, С.В. Корреляционная обработка сигналов и изображений / С.В. Абламейко, С.В. Мальцев, Р.П. Богуш // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. — 2005. – № 4. – С. 45–54.
4. Чертков, В.М. Способ получения идентификационного портрета радиоэлектронных средств перехвата информации методами нелинейной радиолокации / В.М. Чертков, В.К. Железняк // Теоретические и прикладные аспекты информационной безопасности : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 18 мая 2017 г. / редкол.: А.В. Яскевич (отв. ред.) [и др.] / Акад. М-ва внутр. дел. – Минск, 2018. – С. 131–134.
5. Чертков, В.М. Определение нелинейности вольтамперной характеристики объекта, исследуемого нелинейным радиолокатором / В.М. Чертков, В.К. Железняк // Доклады БГУИР. – 2017. – № 8. – С. 60–66.
6. Мальцев, С.В. Эффективные приемы при корреляционной обработке сигналов и изображений : моногр. / С.В. Мальцев, Р.П. Богуш. – Saarbruecken : LAP Lambert Academic Publishing GmbH&Co, 2014. – 180 с.
7. Zaleski, A. Methods and measures similarities algorithm for finding a complex array / A. Zaleski, V. Chertkov // European and national dimension in research. Technology = Европейский и национальный контексты в научных исследованиях : materials of IX Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, April 26–27, 2017 / ed.: D. Lazouski [et al.] / Polotsk State University. – Novopolotsk, 2017. – С. 327–330.
8. В.Ю. Цветков. Контурное позиционирование полутоновых изображений на основе модифицированного фильтра Робертса / В.Ю. Цветков, О.Дж. Аль-Фурайджи, // Доклады Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. 2009. – № 5 (43). – С. 30–37.

Поступила 20.03.2018

ALGORITHM FOR DETERMINING THE DEGREE OF SIMILARITY OF IDENTIFICATION IMAGES FROM SECRET INTELLIGENCE DEVICE

V. CHERTKOV, V. ZHELEZNIAK

The algorithms and methods for determining the similarity measure of images are considered. A general characteristic and a requirement for measures calculating similarities are given. The functions of similarity of correlation type are given. The formation of the identification image is described. A block diagram is presented for investigating the measure of similarity of power polynomials. The results of a computational experiment for determining the best metric for solving the problem are presented. The results of calculating the accuracy of determining the measure of similarity of third-order polynomials are presented.

Keywords: nonlinear radar, identification shape, bug.