

# Обнаружение радиоимпульсов по нефилтрованным сигналам с пространственно разнесенных приемников

А.Г. Ташлинский<sup>а</sup>, М.Г. Царёв<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Ульяновский государственный технический университет, 432027, ул. Северный Венец, 32, Ульяновск, Россия

## Аннотация

Рассмотрено два рекуррентных алгоритма обнаружения радиоимпульсов по нефилтрованным дискретизированным сигналам с разнесенных приемников, например, элементов антенной решетки. Алгоритмы основаны на безыдентификационном оценивании параметров взаимных рассогласований сигналов. Одним из критериев обнаружения выбрана стабилизация оценок параметров привязки сигналов при достижении ими оптимальных значений. Другой критерий базируется на анализе коэффициента корреляции между привязываемыми сигналами. Привязка сигналов осуществляется в реальном времени. Показано, что при выборе в качестве целевой функции качества привязки коэффициента корреляции между исследуемыми сигналами, достаточно оценивания только временного сдвига между ними. Предложенные алгоритмы показали работоспособность и высокую достоверность обнаружения радиоимпульсов. Для увеличения вероятности правильного обнаружения они могут быть комплексированы.

*Ключевые слова:* радиолокация; обнаружение; оценивание; радиоимпульс; фильтрация; разнесенный прием; запаздывание; временной сдвиг

## 1. Введение

Одной из проблем при разработке систем радиолокации и радиолокационной борьбы является обнаружение радиоимпульсов в реальном времени. Теоретические аспекты этой проблемы, базирующиеся на принципах непараметрических статистик [1,2], находятся в состоянии интенсивных исследований. При этом наиболее действенные практические результаты при решении нестационарных задач получены, как правило, на основе полуэвристических методов, и используют робастные приближения реальных непараметрических распределений статистик ограниченных объемов [2,3]. Широко используемыми методами преодоления априорной неопределенности также являются метод Роббинсона [4] и эмпирический байесовский подход [5], когда оценки неизвестных априорных данных формируются на основе апостериорных результатов. Для многих практических задач (но далеко не для всех) метод Роббинсона является достаточно эффективным. В качестве подхода в данном направлении можно отметить и метод нелинейной робастной фильтрации [2,6], основанный на условно-параметрическом обнаружении нестационарных сигналов при действии произвольных помех. Этот метод применим как в условиях статистической априорной неопределенности, так и в условиях мощных помех. Однако даже при известных распределениях помех, например, при аддитивном белом шуме, функционалы правдоподобия становятся многомодальными распределениями неизвестного вида.

Методология синтеза новых алгоритмов базируется на принципах теории робастных статистик и марковских случайных процессов. При таких подходах задача обнаружения радиоимпульсов формулируется как задача проверки сложных статистических гипотез относительно распределения наблюдаемой выборки, что требует достаточного высокого объема вычислительных затрат.

Другой группой методов, решающих задачу обнаружения сигналов, являются методы, оперирующие в частотной области [7]. В широкой полосе частот на фоне аддитивного шума, как правило, присутствуют несколько узкополосных радиосигналов. При этом априорные сведения о количестве сигналов, их несущих частотах, способе и параметрах модуляции отсутствуют. В наблюдаемой выборке спектральных отсчетов исследуемого процесса каждый временной отсчет сложным образом зависит от спектральных параметров всех присутствующих сигналов. Этот факт затрудняет процесс обнаружения и оценивания параметров сигналов.

Переход в частотную область на первый взгляд облегчает решение поставленной задачи. Здесь зависимость вероятностных характеристик спектральных коэффициентов от параметров сигналов оказывается более локальной, поскольку узкополосные сигналы хорошо разделяются по частоте [8]. При построении спектрограммы наблюдаемый во времени процесс делится на равные сегменты, в пределах которых его предполагают стационарным. Существует множество методов оценки спектрограммы (методы Уэльча, Даньелла, Бартлетта) [9]. Эти методы основаны на применении к процессу «оконных функций», которые могут быть различной формы (окна Чебышева, Парзена, Гаусса и т.д.). Однако, несмотря на эффективность алгоритмов быстрого преобразования Фурье, вычислительная сложность частотных методов остается довольно большой.

В работах [10,11] предложен алгоритм решения рассматриваемой задачи, основанный на совместной обработке разностно-временных и разностно-фазовых измерений сигналов от двух разнесенных приемников, расположенных на одном объекте. В трактах каждого из приемников посредством линейки узкополосных полосовых фильтров, перекрывающих заданный рабочий диапазон, формируется совокупность сигналов разных спектральных диапазонов. Условием обнаружения является превышение уровнем сигнала некоторого заданного порогового значения в любом из исследуемых диапазонов. Такой подход, однако, обладает и явным недостатком: большое число ложных срабатываний при относительно низком отношении сигнал/шум.

Кроме того, любая фильтрация приводит к потере части полезной информации об исходном сигнале, что увеличивает погрешность оценивания параметров сигнала и даже может привести к пропуску его обнаружения. Поэтому актуальным является разработка алгоритмов обнаружения и оценивания параметров сигнала, использующих отсчеты нефильтрованного процесса. Одним из ключевых условий при разработке подобных алгоритмов является требование их вычислительной эффективности.

В работе рассмотрено два рекуррентных алгоритма обнаружения в реальном времени радиоимпульсов, основанных на совместной обработке нефильтрованных сигналов с разнесенных приемников, например, элементов антенной решетки. Первый основан на анализе в скользящем окне изменения вероятностных свойств оценок временного сдвига в процессе сходимости, второй – на измерении в скользящем окне коэффициент корреляции (КК) сигнала с одного из приемников и привязанного к нему сигнала с другого приемника.

## 2. Алгоритм, основанный на анализе сходимости оценок параметров привязки

Для нахождения в реальном времени временного сдвига нефильтрованных сигналов с разных приемников можно воспользоваться безыденфикационной псевдоградиентной процедурой [12] оценивания параметров взаимных рассогласований двух сигналов (привязки сигналов). При этом кроме временного сдвига сигналы с приемников имеют разный уровень интенсивности, и в общем случае параметрами их привязки будут взаимный временной сдвиг и коэффициент усиления, выравнивающий сигналы по уровню. В рассматриваемой задаче нас интересует только временной сдвиг, поэтому в качестве целевой функции качества оценивания целесообразно использовать КК. При этом число параметров привязки сокращается до одного [13], так как линейное изменение уровня сигнала не изменяет КК.

Оптимальные значения параметров привязки радиоимпульсов априорно не известны, однако достижение оценками параметров их окрестности можно косвенно определить, рассматривая последовательность оценок как случайный процесс и анализируя изменение вероятностных свойств оценок в процессе сходимости. Ряд таких критериев предложен в работе [14]. Они основаны на том, что характер поведения оценок при достижении окрестности оптимального значения существенно меняется. При привязке двух слабо коррелированных сигналов оценка их временного сдвига колеблется вокруг нулевого значения с относительно большой дисперсией. Оценки при этом не сходятся к какому-то конкретному значению. Такая ситуация характерна для случая отсутствия «полезного» радиосигнала от источника излучения. При наличии радиоимпульса после достижения оптимального значения оценка сдвига стабилизируется и имеет лишь небольшие случайные отклонения. Такая стабилизация при достижении оценками параметров привязки сигналов оптимальных значений может быть использована для решения задачи обнаружения сигналов. Хорошие результаты при этом достигаются при использовании в качестве критерия сходимости оценок минимума их тренда. Из приведенного на рис. 1 примера (где  $\hat{h}$  - оценка сдвига радиоимпульсов,  $n$  - номер итерации оценивания) видно, что до стабилизации оценок характерны участки с восходящим и нисходящим трендом (рис. 1,а), после стабилизации (рис. 1,б) тренд в среднем исчезает.

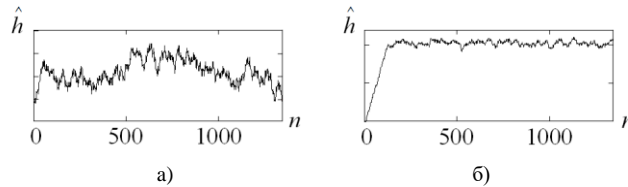


Рис. 1. Сходимость оценок привязки сигналов.

В алгоритме, реализующем критерий, параметр  $\hat{h}$  аппроксимируется в скользящем окне линейной функцией  $s_t = \gamma_t k + c_t$  (прямой линией), где:  $k = t, t + w$ ;  $w$  - размер окна;  $t$  - дискретное время (здесь и далее предполагается, что  $n = t$ ). Если модуль тангенса угла наклона этой прямой в течение некоторого заданного числа итераций  $\Gamma$  не выходит за пороговое значение, то процесс оценивания считается стабилизировавшимся. Параметры линейной функции можно найти, например, методом наименьших квадратов:

$$\gamma_t = (wa - be) / (wd - e^2), \quad c_t = w^{-1}(a - \gamma_t e),$$

$$\text{где: } a = \sum_{k=t}^{t+w} k \hat{h}_k, \quad b = \sum_{k=t}^{t+w} \hat{h}_k, \quad e = \sum_{k=t}^{t+w} k, \quad d = \sum_{k=t}^{t+w} k^2.$$

Использованный критерий обеспечивает слабую зависимость его параметров от характеристик сигналов и величины шума. Достоинством такого подхода является и то, что после обнаружения стабилизации процесса, оценки, полученные на итерациях с  $(t-w)$ -й по  $t$ -ю, можно использовать для повышения точности нахождения временного сдвига, например, усреднив их. Однако возникает проблема выбора размера окна  $w$ , поскольку при малом окне небольшие колебания оценок после стабилизации могут восприниматься как участки с трендами, а большое окно увеличивает вероятность ложного обнаружения.

Пример результатов работы алгоритма при  $w = 100$  на экспериментальных данных, взятых из работы [15], приведен на рис. 2, где:  $X$  и  $Y$  - сигналы с разнесенных приемников;  $\hat{h}$  - оценка сдвига радиоимпульсов;  $\gamma$  и  $\gamma_{кр} = 5 \cdot 10^{-4}$  -

величина и пороговое значение угла наклона тренда;  $P$  - результат проверки гипотезы об обнаружении радиоимпульса при  $\Gamma = 60$ . Из рисунка видно, что радиоимпульс уверенно обнаруживается.

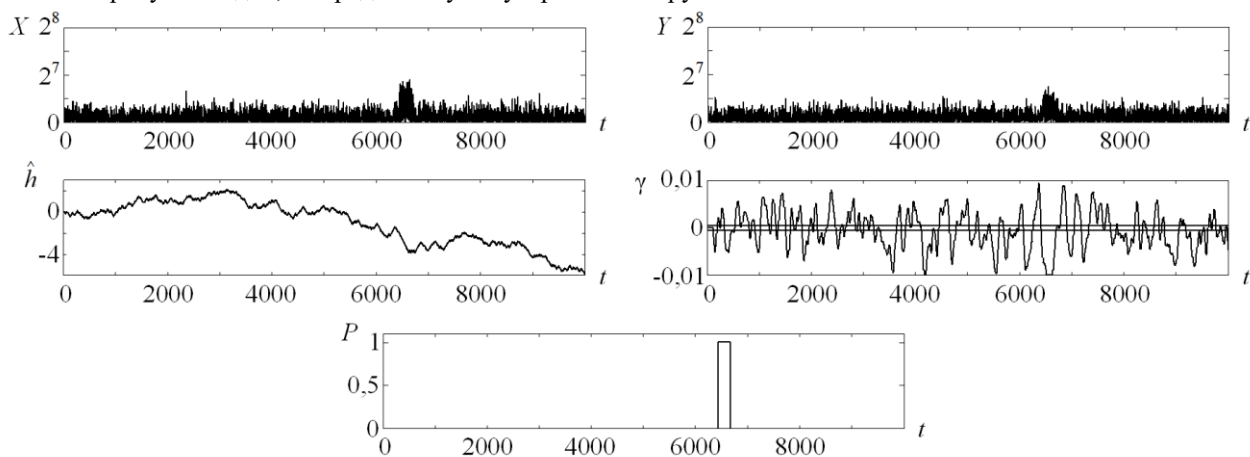


Рис. 2. Обнаружение радиосигнала по характеру сходимости оценок.

### 3. Алгоритм, основанный на анализе корреляции сигналов

#### 3.1. Использование классического корреляционного способа обнаружению импульсов

Рассмотрим эффективность использования для решения задачи обнаружения радиоимпульсов в нефильтованном сигнале классического корреляционного подхода, состоящего в вычислении в скользящем окне коэффициента корреляции (КК) между двумя исследуемыми дискретизированными последовательностями отсчетов с выходов разнесенных приемников.

Критерием обнаружения радиоимпульсов можно выбрать превышение КК некоторого порогового значения. При увеличении размера окна (но не более длительности искомого импульса) увеличивается и вероятность обнаружения. Но увеличение размера скользящего окна при этом приводит также и к увеличению вычислительных затрат.

Заметим, что КК зависит и от разности фаз  $\Delta\varphi$  несущей частоты радиоимпульсов с разнесенных приемников, то есть от временного сдвига  $h$  между импульсами. При  $1.5\pi > \Delta\varphi > \pi$  значение КК отрицательно, а при  $\Delta\varphi = 0.5\pi$  - равно 0. Поэтому для усиления критерия обнаружения сигналов в экспериментах использовано абсолютное значение КК.

#### 3.2. Модификация корреляционного способа обнаружения для радиоимпульсов

Анализ показал, что основной причиной неэффективности классического корреляционного подхода для решаемой задачи обнаружения местоположения радиоимпульсов в нефильтованном сигнале является зависимость КК от сдвига фаз несущих частот радиоимпульсов. В свою очередь, сдвиг фаз определяется временным сдвигом  $h$  между сигналами с разных приемников, который можно скомпенсировать, используя текущие оценки параметров привязки сигналов, формируемые, например, в реальном времени псевдоградиентной процедурой [15,16].

Тогда алгоритм обнаружения радиоимпульсов состоит в следующем. По отсчетам сигналов, поступающих с двух пространственно разнесенных приемников, в скользящем окне формируется оценка  $\hat{h}_t$  сдвига сигналов. С учетом полученной оценки в другом скользящем окне, вычисляется текущее значение КК, для чего последовательность отсчетов с одного из приемников интерполируются. Такой подход позволяет скомпенсировать временной сдвиг несущих частот радиоимпульсов.

Пример результатов работы алгоритмов, основанных на классическом и модифицированном подходах, показан на рис. 3, где приведены графики по данным двух экспериментов (рис. 3,а и рис. 3,б соответственно). Для каждого эксперимента левый график соответствует модулю КК, найденному на базе классического корреляционного подхода, а правый – КК, найденному в соответствии с модифицированным подходом. Там же показан также порог обнаружения, значение которого было выбрано равным 0.7. В качестве исходных данных использованы экспериментальные данные из работы [15]. Отношение сигнал/шум в канале около 6 дБ, размер скользящего окна для вычисления КК был выбран равным 100 отсчетам.

Анализ результатов показывает, что при классическом подходе в случае б) радиоимпульс не обнаруживается, а в случае а) обнаруживается только малая часть, что неточно определяет его местоположение. Такой подход для задачи обнаружения местоположения радиоимпульсов в нефильтованном сигнале оказался малоэффективен. При модифицированном корреляционном подходе в обоих случаях радиоимпульсы уверенно обнаруживаются, что говорит о возможности его использования для решения поставленной задачи.

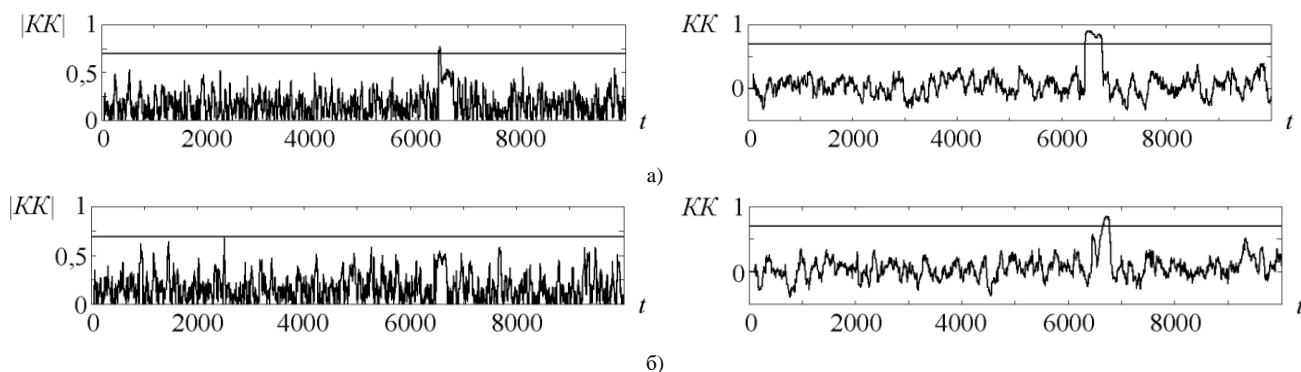


Рис. 3. Обнаружение радиоимпульса при классическом и модифицированном корреляционных подходах.

### 3.3. Повышение достоверности обнаружения за счет учета минимальной длительности радиоимпульса

Значение коэффициента корреляции в момент появления радиоимпульса резко нарастает и, как правило, превышает порог на протяжении почти всей его длительности. Это обстоятельство может быть использовано для сокращения вычислительных затрат и уменьшения числа ложных обнаружений.

Объем вычислительных затрат во многом определяется размером скользящего окна, в котором вычисляется КК. Для сокращения затрат размер окна нужно уменьшать, но это увеличивает вероятность ложного обнаружения. Это иллюстрирует рис. 4, где на рис. 4,а приведен график КК, а на рис. 4,б - результат обнаружении радиоимпульса при малом размере скользящего окна, равном 20 отсчетам. Видно, что при уменьшении размера окна привело к значительному увеличению ложных обнаружений.

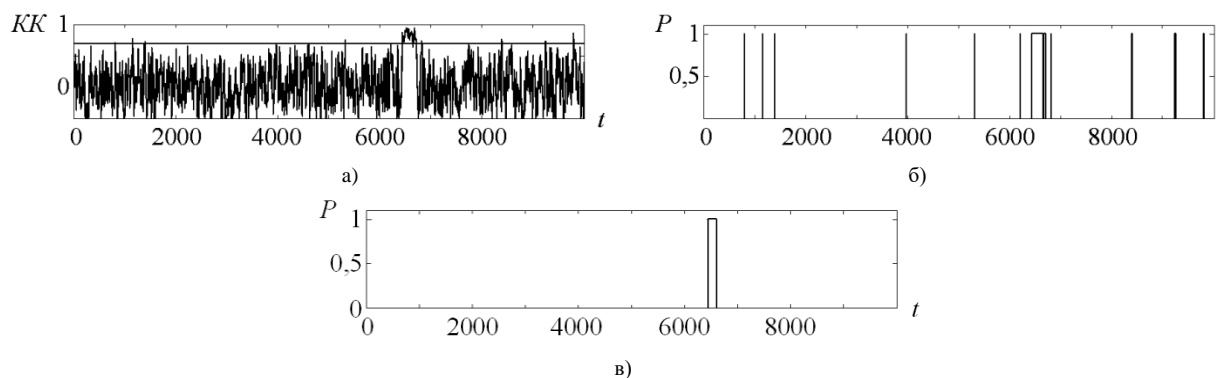


Рис. 4. Обнаружение радиоимпульсов с учетом его возможной длительности.

Однако практически все ложные обнаружения имеют длительность, много меньшую длительности искомого импульса, а время правильного обнаружения соизмеримо с ней. Это обстоятельство можно использовать для отбраковки ложных обнаружений. Результат успешной отбраковки при принятой минимальной длительности сигнала, равной 50 отсчетам, приведен на рис. 4,в.

## 4. Заключение

Показана возможность использования псевдоградиентного оценивания параметров взаимных рассогласований сигналов при решении задачи обнаружения радиоимпульсов по нефитрированным дискретизированным сигналам с пространственно разнесенных приемников. Такой подход при устойчивости к импульсным помехам обеспечивает хорошие точностные возможности при небольшом объеме вычислительных затрат, что позволяет реализовывать его в системах реального времени.

Рассмотрено два алгоритма обнаружения радиоимпульсов. Первый использует стабилизацию оценок параметров привязки сигналов при достижении ими оптимальных значений. Привязка сигналов осуществляется рекуррентно в реальном времени. Другой алгоритм основан на анализе КК между привязываемыми сигналами с разнесенных источников. При этом показано, что классический корреляционный подход для задачи обнаружения местоположения радиоимпульсов в нефитрированном сигнале малоприменим из-за зависимости КК от сдвига фаз несущих частот радиоимпульсов. Предложен способ компенсации в реальном времени фазового сдвига при вычислении КК с использованием текущих оценок параметров привязки радиоимпульсов.

Апробация рассмотренных алгоритмов на моделированных и реальных экспериментальных данных показала высокую вероятность правильного обнаружения местоположения радиоимпульсов, устойчивость к помехам, и небольшой объем требуемых вычислительных затрат, что позволяет реализовывать их в системах реального времени. Для увеличения достоверности обнаружения радиоимпульсов алгоритмы могут быть комплексированы.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-41-732053, а также гранта РФФИ № 16-01-00276.

## Литература

- [1] Акимов, П.С. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др.; под ред. П.А. Бакута. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
- [2] Неволин, В.И. Робастные информационные системы. Методы синтеза и анализа / В.И. Неволин. – М.: Радио и связь, 2008. – 312 с.
- [3] Хьюбер, Дж.П. Робастность в статистике: Пер. с англ. / Дж.П. Хьюбер. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
- [4] Репин, В.Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.
- [5] Кобзев, А.В. Оптимальная пространственно-временная обработка сигналов неизвестного вида в многоканальных приемных системах / А.В. Кобзев, В.В. Романенко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2012. – № 2(31). – С. 74-77.
- [6] Неволин, В.И. Робастное совместное обнаружение и оценка параметров радиоимпульсов на фоне совпадающих по спектру помех / В.И. Неволин, В.В. Бельков // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2011. – № 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/win/jan11/index.html> (01.01.2011).
- [7] Бородич, Ё.Ю. Применение принципа инвариантности при обнаружении сигнала в частотном интервале / Ё.Ю. Бородич // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т. 4, № 2. – С. 111-114.
- [8] Дворников, С.В. Частотно-временное оценивание параметров сигналов на основе функций огибающих плотности распределения их энергии / С.В. Дворников, Ю.Х. Маджар, Ё.Ю. Бородич, Ю.Х. Махлуф // Информация и космос. – 2007. – № 4. – С. 41-45.
- [9] Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие / А.Б. Сергиенко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
- [10] Потапова, Т.П. Алгоритм оценки координат источников радиоизлучения с использованием данных разностно-фазовых измерений, полученных двухканальным пеленгатором, размещенным на одиночном летательном аппарате / Т.П. Потапова, Н.В. Топорков, Ю.М. Шабатура // Излучение и рассеяние электромагнитных волн. – 2013. – С. 710-714.
- [11] Потапова, Т.П. Алгоритм определения координат источников радиоизлучения с летательного аппарата на основе фазово-временной сигнальной информации от двух приемных модулей / Т.П. Потапова, Н.В. Топорков, Ю.М. Шабатура // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: приборостроение. – 2010. – № 1. – С. 52-61.
- [12] Tashlinskii, A.G. Computational expenditure reduction in pseudo-gradient image parameter estimation / A.G. Tashlinskii // Lecture Notes in Computer Science. – 2003. – V. 2658. – P. 456-462.
- [13] Tashlinskii, A.G. An algorithm for time shift estimation of radio pulses received by spatially distributed sensors / A.G. Tashlinskii, M.G. Tsarev // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), IEEE Conference № 35463. – 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147237
- [14] Kaveev I.N. A Way to Stop the Process for Searching for an Image Fragment by Analyzing the Estimation Convergence of Position Parameters / I.N. Kaveev, A.G. Tashlinskii, R.M. Kurbanaliev // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – V. 21, N. 2. – P. 262-266.
- [15] Ташлинский, А.Г. Алгоритм оценивания временного сдвига радиоимпульсов с разнесенных приемников / А.Г. Ташлинский, Н.В. Топорков, Т.П. Потапова, М.Г. Царёв // Радиотехника. – 2015. – № 6. – С. 24-28.
- [16] Ташлинский, А.Г. Псевдоградиентное оценивание временного сдвига сигналов разнесенных приемников с использованием ПЛИС / А.Г. Ташлинский, М.Г. Царёв // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 2(44). – С. 93-99.