

Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 4 (150). С. 90–96.
Izvestiya of Altai State University. 2026. No 4 (150). P. 90–96.

Научная статья

УДК 519.688

[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-12](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-12)

**Программная поддержка в задачах оптимальной
локализации сигнально-точечных источников
со случайной дисциплиной генерации импульсов**

Александр Львович Резник¹, Александр Анатольевич Соловьев²

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия,
reznik@iae.nsk.su

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия,
soloviev@iae.nsk.su

Original article

**Software Support for Optimal Localization of Signal-Point
Sources with Random Pulse Generation**

Alexander L. Reznik¹, Alexander A. Soloviev²

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia,
reznik@iae.nsk.su

²Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia,
soloviev@iae.nsk.su

Аннотация. В статье анализируются алгоритмы оптимального по быстродействию динамического поиска точечных пуассоновских источников, которые в случайные моменты времени генерируют сверхкороткие (мгновенные) дельта-импульсы. Важной отличительной особенностью предложенных в статье алгоритмов является то, что для расчета громоздких многомерных интегральных выражений, возникающих в ходе решения задачи, авторами разработаны и применены (с реализацией на специализированном кластере) методы ускорения, основанные на распараллеливании вычислений. Приведен пример программного расчета параметров оптимального поискового алгоритма для нескольких локализуемых импульсных объектов при заданной точности локализации. Рассчитаны оптимальные значения числа этапов сканирования, при которых среднее время локализации достигает минимума. Описанные в настоящей работе поисковые стратегии ориентированы на локализацию источников, имеющих равномерную плотность распределения. Но проведенные исследования открывают дальнейшую перспективу для расчета оптимальных по быстродействию алгоритмов локализации для случайных сигнальных источников с произвольной плотностью распределения.

Ключевые слова: локализация точечных источников, оптимальные алгоритмы

Abstract. The article analyzes algorithms for the fast-optimized dynamic search for point Poisson sources that generate ultrashort (instantaneous) delta pulses at random instants. A key distinguishing feature of the algorithms proposed in this article is that the authors developed and applied (and implemented on a specialized cluster) acceleration methods based on parallel computations to calculate the cumbersome multidimensional integral expressions that arise during the solution of the problem. An example of a software calculation of the parameters of an optimal search algorithm for several localized pulsed objects with a given localization accuracy is provided. The optimal number of scanning stages for minimizing the average localization time is calculated. The search strategies described in this paper are focused on localizing sources with a uniform distribution density, but the conducted research opens up further prospects for developing fast-optimized localization algorithms for random signal sources with arbitrary distribution densities.

Keywords: localization of point sources, optimal algorithms

Для цитирования: Резник А.Л., Соловьев А.А. Программная поддержка в задачах оптимальной локализации сигнально-точечных источников со случайной дисциплиной генерации импульсов // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 4 (150). С. 90–96. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-12](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-12).

Благодарности: исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041700103-1).

Введение

В работе описывается один из алгоритмов оптимального многоцелевого поиска точно-импульсных объектов. Формулировка основной задачи звучит следующим образом. Известно, что на отрезке $(0, L)$ имеется n точечных сигнальных объектов. Нет никаких априорных сведений об их координатах внутри поискового интервала, так что можно считать, что n точно-импульсных объектов равномерно распределены на отрезке $(0, L)$. Все источники в случайные моменты времени способны произвести сверхкороткие (мгновенные) импульсы, при этом для каждого из них продолжительность паузы между импульсами является случайной величиной, имеющей показательную плотность вероятности $pause(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$. Процесс локализации и уточнения координат сигнальных источников ведется с помощью детекторного приемника, «окно обзора» которого может произвольно меняться во времени, обеспечивая необходимую дисциплину поиска. Импульс фиксируется, если активный объект, производивший импульс, в момент генерации импульса находился в окне детекторного приемника. Требуется за минимальное (в статистическом плане) время отыскать все источники с точностью ε .

Вопросы, математическая формулировка которых близка к описанной выше задаче локализации точно-импульсных источников, встречаются в различных научно-технических приложениях. Схожие задачи возникают, например, в технической диагностике — в частности, при поиске неисправностей в системах с перемежающейся дисциплиной отказов [1–2]. При обработке спутниковых видеопоследовательностей аналогичные вопросы возникают в задачах обнаружения и сопровождения малоразмерных динамических объектов [3–4]. В радиофизике и астрономии одной из таких задач является поиск и уточнение координат барстеров — сигнальных источников рентгеновского излучения [5–6].

В настоящей работе схема построения оптимального алгоритма локализации набора из нескольких источников основана на многоэтапной процедуре: на первом этапе с требуемой точностью определяется местоположение одного из n источников, далее производится поиск одного из $(n-1)$ оставшихся ис-

For citation: Reznik A.L., Soloviev A.A. Software Support for Optimal Localization of Signal-Point Sources with Random Pulse Generation. *Izvestiya of Altai State University*. 2026. No 4 (150). P. 90–96. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-12](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-12).

Acknowledgments: this work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. № 124041700103-1).

точников и т.д. В свою очередь, каждый из n поисковых этапов разбивается на самостоятельные подэтапы и тоже рассматривается как многошаговый процесс. Ранее такая схема продемонстрировала свою эффективность в работах [7, 8].

1. Алгоритм оптимального поиска источников с равномерной плотностью распределения

Так как первоначально не имеется никаких априорных сведений о расположении n источников внутри отрезка $(0, L)$, то на первом шаге поисковое усилие должно быть равномерно распределено между всеми точками $x \in (0, L)$. Реализовать такое усилие можно, например, сканированием всего отрезка некоторым детекторным окном, имеющим апертуру размером l_1 . Затем (при регистрации импульса) поиск продолжается внутри выделенного детекторного окна, имеющего ширину l_1 , некоторой другой щелью, имеющей ширину l_2 , и т.д. На последнем шаге (а их количество зависит от n, ε, L) для обеспечения необходимой точности локализации поиск ведется щелью шириной ε . После нахождения одного из объектов значение n уменьшается на единицу, и поиск повторяется для $n=n-1$ и т.д. Задача теперь заключается в том, чтобы для заданных значений n, ε и L определить оптимальное число этапов сканирования и оптимальные размеры сканирующих окон на каждом из них, причем рассчитанные величины должны обеспечить наименьшее (в статистическом плане) суммарное время локализации совокупного набора разыскиваемых объектов.

Введем в рассмотрение функцию $g(x)$ — плотность распределения центра детекторного окна приемного устройства в момент регистрации первого импульса. Если предположить, что n источников расположены в точках $x_1, x_2, \dots, x_n$, а сканирование проводится щелью шириной l , то для функции $g(x)$ справедливо соотношение

$$g(x) = \frac{1}{nl} \sum_{i=1}^n 1[x - (x_i - 0.5l)] \times 1[(x_i + 0.5l) - x], \quad (1)$$

где $1[x]$ — функция Хевисайда: $1[x] = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$.

В дальнейшем нам потребуется знание распределения числа объектов в детекторном окне в момент регистрации импульса. Для этого нужно вычислить $P_n(k, l)$ — вероятность того, что в окне детектора в момент регистрации импульса окажется в точности k ($k=1, 2, \dots, n$) источников, включая объект — генератор импульса. Поскольку при реализации равномерного поискового усилия возникают нежелательные краевые эффекты, то для того чтобы последующее изложение сделать более строгим, будем считать отрезок свернутым в окружность длиной L . При этом без ограничения общности можно считать, что $L=1$, а $0 < l \leq 1$.

Пусть объекты расположены в точках $x_1, x_2, \dots, x_n$. Считая точку x_1 началом отсчета, упорядочим все остальные источники, двигаясь от точки начала координат $x_1=0$ по часовой стрелке. Вероятность $P_n(k, l)$ складывается из вероятностей того, что в момент фиксации импульса в детекторное окно попадают точки $x_1, x_2, \dots, x_k$ либо $x_1, x_2, \dots, x_{k+1}$ и т.д. Таких комбинаций всего n . Если предположить, что при регистрации импульса в окне находится в точности k объектов, то, учитывая (1),

$$P_n(k, l) = \frac{(n-1)! \times k \times 2}{l} \int \dots \int_D \min \{l - x_k; x_{k+1} - x_k; x_{k+1} - l + 1\} dx_2 \dots dx_n, \quad (2)$$

где область D задается следующей системой неравенств:

$$\begin{cases} 0 < x_2 < x_3 < \dots < x_n < 1, \\ x_{k+1} - x_k \leq 1 - x_n, \\ x_{k+1} + (1 - x_n) > l, \\ x_k < l. \end{cases} \quad (3)$$

Интеграл (2) по области (3) может быть представлен как сумма трех интегралов:

$$P_n(k, l) = \frac{2k(n-1)!}{l} \left\{ \int_{D_1} \dots \int (l - x_k) dx_2 \dots dx_n + \right. \\ \left. + \int_{D_2} \dots \int (x_{k+1} - x_k) dx_2 \dots dx_n + \int_{D_3} \dots \int (x_{k+1} - l + 1 - x_n) dx_2 \dots dx_n \right\}. \quad (4)$$

Здесь областям D_1, D_2, D_3 соответствуют следующие системы линейных неравенств с одним свободным параметром l :

$$D_1 = \begin{cases} x_1 = 0 < x_2 < x_3 < \dots < x_n < 1 = x_{n+1}, \\ x_{k+1} - x_k < 1 - x_n, \\ x_{k+1} + (1 - x_n) > l, \\ x_k < l, \\ x_{k+1} - l > 0, \\ x_k + x_{k+1} - x_n + 1 - 2l > 0, \end{cases} \quad D_2 = \begin{cases} x_1 = 0 < x_2 < x_3 < \dots < x_n < 1 = x_{n+1}, \\ x_{k+1} - x_k < 1 - x_n, \\ x_{k+1} + (1 - x_n) > l, \\ x_k < l, \\ l - x_{k+1} > 0, \\ x_k - x_n + 1 - l > 0, \end{cases} \quad D_3 = \begin{cases} x_1 = 0 < x_2 < x_3 < \dots < x_n < 1 = x_{n+1}, \\ x_{k+1} - x_k < 1 - x_n, \\ x_{k+1} + (1 - x_n) > l, \\ x_k < l, \\ -x_k - x_{k+1} + x_n - 1 + 2l > 0, \\ -x_k + x_n - 1 + l > 0. \end{cases} \quad (5)$$

2. Расчет интегральных выражений с помощью параллельных вычислений

Рассчитать интеграл (4) из раздела 1 вручную затруднительно уже при $n=4$ — слишком велик объем необходимых выкладок. Поэтому нами были предложены специализированные алгоритмы, реализованные на многопроцессорном кластере с применением

технологии распараллеливания вычислений. Это позволило произвести расчет интегральных выражений (4) для достаточно больших значений параметра n — вплоть до $n=15$. Разработанные алгоритмы реализованы в виде программной системы для вычислительного кластера ИВЦ НГУ, производительность которого составляет более 5000 Гфлопс. В качестве языка программирования

ния использовался язык C++, программная архитектура строилась с использованием интерфейсов OpenMP и MPI [9, 10]. Основное преимущество параллельного алгоритма состоит в том, что он позволяет существенно сократить время, требующееся для преобразования систем уравнений D_1, D_2 и D_3 (5). Принципиальная схема работы алгоритма отражена на рисунке:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_2 > \alpha, \\ x_2 > \beta, \\ \vdots \\ \vdots \\ x_2 < x_3. \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} x_2 > \alpha, \\ \vdots \\ x_2 < x_3 \\ \alpha > \beta. \end{array} \right. \Rightarrow \text{CPU - 1}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_2 > \alpha, \\ x_2 > \beta, \\ \vdots \\ \vdots \\ x_2 < x_3. \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} x_2 > \beta, \\ \vdots \\ x_2 < x_3 \\ \beta > \alpha. \end{array} \right. \Rightarrow \text{CPU - 2}$$

Принципиальная схема параллельной обработки многомерной системы неравенств

Как показано на рисунке, многомерная система неравенств имеет два альтернативных нижних предела — α и β . В то время как обычному алгоритму требуется последовательно проверить оба варианта, параллельный алгоритм может проверить эти варианты одновременно, пересылая данные на разные процессоры. Как результат мы получаем существенное ускорение вычислительного процесса. При таком подходе все ядра являются «равноправными» и выполняют одинаковую работу (при тестировании раз-

личных вариантов распараллеливания было установлено, что для случаев $n > 10$ загрузка ядер происходит относительно равномерно, а это, в свою очередь, позволяет исключить процедуры межпроцессорного взаимодействия). На финальном этапе результаты, полученные для всех ядер, объединяются с учетом границ изменения свободного параметра ε .

3. Использование программных расчетов

для построения оптимальной процедуры поиска

Проведенные на вычислительном кластере расчеты (при фиксированных значениях n и k) показали, что в общем случае

$$P_n(k, l) = \binom{n-1}{k-1} l^{k-1} (1-l)^{n-k}. \quad (6)$$

Вообще говоря, соотношение (6) представляет собой смещенную схему Бернулли: мы проводим $(n-1)$ независимых испытаний, где вероятность «успешного испытания» $p=l$ и вероятность «неуспешного испытания» $q=(1-l)$. Иначе говоря, формула (6) описывает вероятность того, что будет зарегистрировано в точности $(k-1)$ «успешных испытаний». Когда выражение для вероятности $P_n(k, l)$ получено, становится возможным содержательно доказать правильность проведенных на вычислительном кластере аналитических выкладок.

Сканирование единичной окружности дугой («щелью»), имеющей длину l , создает равномерное поисковое усилие по всей окружности. Вероятность того, что фиксированный источник $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ будет инициатором импульса, одинакова для всех рассматриваемых объектов и равна $1/n$. Поэтому по формуле полной вероятности

$$P_n(k, l) = \sum_{i=1}^n P(A_i) P_n(k, l / A_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_n(k, l / A_i) = P_n(k, l / A_1), \quad (7)$$

где событие A_i означает, что именно объект x_i являлся инициатором зарегистрированного импульса. Условную вероятность $P_n(k, l / A_1)$ следует интерпретировать следующим способом: все источники, кроме первого, «заблокированы», а при регистрации импульса учитывается общее число объектов в щели, включая первый.

Если последовательно сканировать единичную окружность сначала апертурой l_1 , а затем (после фиксации первого импульса) с помощью другой щели $l_2 (l_2 < l_1)$ сканировать свернутую в окружность дугу l_1 , то вероятность того, что при регистрации второго импульса в щели будет находиться ровно k сигнальных объектов, может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sum_{i=k}^n P_n(i, l_1) P_i(k, \frac{l_2}{l_1}) &= \sum_{i=k}^n \binom{n-1}{i-1} l_1^{i-1} (1-l_1)^{n-i} \binom{i-1}{k-1} \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^{k-1} \left(1 - \frac{l_2}{l_1} \right)^{i-k} \\ &= \binom{n-1}{k-1} l_2^{k-1} \sum_{i=k}^n \binom{n-k}{n-i} (l_1 - l_2)^{i-k} (1-l_1)^{n-i} = \\ &= \binom{n-1}{i-1} l_2^{k-1} \sum_{i=0}^{n-k} \binom{n-k}{i} (l_1 - l_2)^i (1-l_1)^{n-k-i} = \binom{n-1}{i-1} l_2^{k-1} (1-l_2)^{n-k}, \end{aligned} \quad (8)$$

Эта вероятность не зависит от того, какую апертуру мы использовали при проведении первого сканирования. Теперь с помощью соотношений (6) и (8) можно найти среднее время локализации одного из n объектов с заданной точностью ε (в данном случае

считаем, что поиск является m -этапным процессом, в котором последовательно используются сужающиеся щели $l_1, l_2, \dots, l_{m-1}, \varepsilon$). Сначала необходимо вычислить среднее время поиска на этапе с номером i :

$$\begin{aligned} \langle \tau_i \rangle &= \sum_{k=1}^n \binom{n-1}{k-1} l_{i-1}^{k-1} (1-l_{i-1})^{n-k} l_{i-1} / (l_i k \lambda) = \\ &= (l_{i-1} / (\lambda l_i)) \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} l_{i-1}^k (1-l_{i-1})^{n-k} / (n l_{i-1}) = \frac{1 - (1-l_{i-1})^n}{n \lambda l_i}. \end{aligned} \quad (9)$$

Теперь можно найти среднее время локализации одного из n источников, которая является суммой средних времен локализации на каждом из этапов, поэтому

$$\langle \tau \rangle = \frac{1}{n \lambda} \sum_{i=1}^m (1 - (1-l_{i-1})^n) / l_i, \quad (10)$$

где $l_0=1; l_m=\varepsilon$. Задача оптимального поиска теперь трансформировалась к нахождению величин $m, l_1, l_2, \dots, l_{m-1}$, минимизирующих выражение (10). Если значение m зафиксировано, то оптимальные значения $l_1, l_2, \dots, l_{m-1}$ могут быть найдены из системы уравнений

$$l_{i+1} = \frac{n l_i^2 (1-l_i)^{n-1}}{1 - (1-l_{i-1})^n}, \quad (i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (11)$$

которую можно получить, если приравнять к нулю все частные производные $\frac{\partial \langle \tau \rangle}{\partial l_i}$ ($i = 1, \dots, m-1$) выра-

жения (8). Система уравнений (9) также решалась на ЭВМ для различных фиксированных значений m . Оптимальные значения m (т.е. число этапов сканирования) и соответствующие им значения $l_1, l_2, \dots, l_{m-1}$, при которых среднее время локализации (10) достигает минимума, были рассчитаны для различных значений n и ε/L . На основе полученных данных был сделан следующий вывод: при достаточно высоких требованиях к точности локализации (когда $\varepsilon/L \ll 1$) среднее время локализации первого из объектов будет пропорционально $\ln(\varepsilon/L)$. В таблице приведен пример одного из программных расчетов.

ε/L	n	2	3	5	10	30	50
10^{-1}	m	2	2	1	1	1	1
	l_1/L	0.26	0.24	0.1	0.1	0.1	0.1
	l_2/L	0.1	0.1	–	–	–	–
	T	$\frac{1}{\lambda} 4.19$	$\frac{1}{\lambda} 3.26$	$\frac{1}{\lambda} 2.0$	$\frac{1}{\lambda} 1.0$	$\frac{1}{\lambda} 0.33$	$\frac{1}{\lambda} 0.2$

Пример программного расчета параметров оптимального алгоритма локализации при заданной точности локализации (ε/L)= 10^{-1} . Исходные данные: n — число локализуемых импульсных объектов; L — длина отрезка, на котором сосредоточены импульсные объекты; ε — требуемая точность локализации; λ — пуассоновская мощность генерации импульсов каждым из разыскиваемых сигнальных источников. Результаты программного расчета: m — количество этапов сканирования для локализации первого из n объектов; l_i — размер сканирующей апертуры на i -м этапе ($i=1, \dots, m$); $\langle \tau \rangle$ — среднее время локализации первого объекта.

Заключение

В настоящей работе рассматривался случай локализации случайных точечно-импульсных источников, имеющих равномерную априорную плотность вероятности распределения в пределах поискового интервала. В принципе, предложенная схема может

быть распространена на источники с произвольной плотностью вероятности, но при этом надо учитывать, что расчет оптимальных параметров будет связан с необходимостью решения весьма трудоемких вариационных задач из области теории оптимального управления [11–12].

Библиографический список

1. Ohring M. *Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices*. 2nd Edition, Cambridge: Academic Press, 2014. 758 p.
2. Webster J., Eren H., *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, Boca Raton: CRC Press, 2018. 2360 p.
3. Gomilin G., Kosykh V., Yakovenko N. Matched Filtering of Small-Sized Objects in Images Containing Constant Spatial Interference // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2020. Vol. 56, No 4. P. 440–447. <https://doi.org/10.3103/S8756699020040068>
4. Kuriakose M., Hrishikesh P., Puthussery D., Jiji C. Small Object Detection in Remote Sensing Images. *Advances in Small Satellite Technologies // Proceedings of National Conference on Small Satellite Technology and Applications, NCSSTA 2020*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 67–73. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7474-8>
5. Zhu X., Wen L., Hobbs G. Detection and localization of single-source gravitational waves with pulsar timing arrays // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2015. Vol. 449, No 2. P. 1650–1663. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv381>
6. Arnaud K., Smith R., Siemiginowska A. *Handbook of X-ray Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 197 p.
7. Reznik A., Soloviev A., Torgov A. Localization of Random Pulse Point Sources Using Physically Implementable Search Algorithms // *Optoelectronics Instrumentation and Data Processing*. 2020. Vol. 56. No 6. P. 598–607. <https://doi.org/10.3103/S8756699020060114>
8. Reznik A., Soloviev A. Comparative Analysis Multistage Algorithms for the Localization of Random Pulsed-Point Sources by Efficiency // *Optoelectronics Instrumentation and Data Processing*. 2024. Vol. 60. No 3. P. 372–379. <https://doi.org/10.3103/S8756699024700432>
9. Robey R., Zamora Y. *Parallel and High Performance Computing*, New-York: Manning Publications. 2021. p. 704.
10. Sterling T., Brodowicz M., Anderson M. *High Performance Computing. Modern Systems and Practices*. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier. 2024. 480 p.
11. Pontryagin L. *Mathematical Theory of Optimal Processes*. Milton Park: Routledge. 1987. 320 p.
12. Bertsekas D. *Dynamic Programming and Optimal Control 4th Edition*. New Hampshire: Athena scientific. 2012. 1270 p.

References

1. Ohring M. *Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices*. 2nd Edition, Cambridge: Academic Press, 2014. 758 p.
2. Webster J., Eren H., *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, Boca Raton: CRC Press, 2018. 2360 p.
3. Gomilin G., Kosykh V., Yakovenko N. Matched Filtering of Small-Sized Objects in Images Containing Constant Spatial Interference. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2020. Vol. 56. No 4. P. 440–447. <https://doi.org/10.3103/S8756699020040068>
4. Kuriakose M., Hrishikesh P., Puthussery D., Jiji C. Small Object Detection in Remote Sensing Images. *Advances in Small Satellite Technologies. Proceedings of National Conference on Small Satellite Technology and Applications, NCSSTA 2020*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 67–73. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7474-8>
5. Zhu X., Wen L., Hobbs G. Detection and Localization of Single-Source Gravitational Waves with Pulsar Timing Arrays. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2015. Vol. 449, No 2. P. 1650–1663. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv381>
6. Arnaud K., Smith R., Siemiginowska A. *Handbook of X-ray Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 197 p.
7. Reznik A., Soloviev A., Torgov A. Localization of Random Pulse Point Sources Using Physically Implementable Search Algorithms. *Optoelectronics Instrumentation and Data Processing*. 2020. Vol. 56. No 6. P. 598–607. <https://doi.org/10.3103/S8756699020060114>
8. Reznik A., Soloviev A. Comparative Analysis Multistage Algorithms for the Localization of Random Pulsed-Point Sources by Efficiency. *Optoelectronics Instrumentation and Data Processing*. 2024. Vol. 60. No 3. P. 372–379. <https://doi.org/10.3103/S8756699024700432>
9. Robey R., Zamora Y. *Parallel and High Performance Computing*, New-York: Manning Publications. 2021. p. 704.
10. Sterling T., Brodowicz M., Anderson M. *High Performance Computing. Modern Systems and Practices*. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier. 2024. 480 p.
11. Pontryagin L. *Mathematical Theory of Optimal Processes*. Milton Park: Routledge. 1987. 320 p.
12. Bertsekas D. *Dynamic Programming and Optimal Control 4th Edition*. New Hampshire: Athena Scientific. 2012. 1270 p.

Информация об авторах

А.Л. Резник, доктор технических наук, заведующий лабораторией вероятностных методов исследования информационных процессов, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия;

А.А. Соловьев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории вероятностных методов исследования информационных процессов, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия.

Information about authors

A.L. Reznik, Doctor of Sciences in Technology, Head of the Laboratory of Probability Research Methods for Information Processing, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

A.A. Soloviev, Candidate of Sciences in Technology, Senior Researcher at the Laboratory of Probability Research Methods for Information Processing, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.