

На правах рукописи



Дао Зуй Нам

**РАЗРАБОТКА, РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ
АЛГОРИТМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ, СНАБЖЕННЫХ
КАРТОЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре математического обеспечения и применения электронных вычислительных машин.

Научный руководитель : Кандидат технических наук, доцент

Ивановский Сергей Алексеевич

Доктор технических наук, профессор
Лисс Александр Рудольфович

Официальные оппоненты : Бессмертный Игорь Александрович
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский национальный исследовательский
университет информационных технологий, механики и
оптики , профессор

Кознов Дмитрий Владимирович
кандидат физико-математических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет,
доцент

Ведущая организация : Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Санкт-Петербургский институт информатики и
автоматизации Российской академии наук

Защита состоится « 16 » марта 2016 г., в 15:30 ч. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертации Д212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан « 13 » января 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.01,

к.т.н., доцент

Щеголева Н. Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Прикладная задача локализации мобильных объектов часто встречается при решении научно-технических задач, например, в областях робототехники, исследования Мирового океана, в системах двойного назначения и т.п. Задача определения точного местоположения мобильного объекта – проблема локализации или позиционирования, - является одной из важнейших задач, а для её формализации, получения алгоритма решения и его программной реализации используются модели и методы вычислительной геометрии и программирования. Информация о точном местоположении мобильного объекта необходима для решения более сложных и комплексных задач навигации, построения пути и построения карты окружающей среды. Существует несколько различных подходов к решению проблемы локализации. Эти подходы основаны на применении различных сенсоров, используют алгоритмы обработки данных и управления перемещениями мобильного объекта. Один из подходов к локализации основан на применении моделей и методов вычислительной геометрии (*computational geometry*), которые позволяют анализировать все гипотетические местоположения объекта и при этом *минимизировать* расстояние, проходимое объектом в процессе локализации. Оптимизационная геометрическая задача, к которой таким образом сводится локализация мобильного объекта, снабженного картой, оказывается NP-трудной. Вместо точного решения NP-трудной задачи применяются почти оптимальные (приближенные) стратегии локализации. Тем не менее, вычислительная сложность алгоритмов, разработанных в рамках такого подхода, оказывается слишком значительной с точки зрения многих приложений. Поэтому важной как теоретически, так и практически становится проблема уменьшения вычислительной сложности алгоритмов локализации, возможно, даже ценой некоторого снижения точности приближения. Таким образом, в настоящей диссертационной работе речь идет о разработке таких модификаций ранее известных алгоритмов или таких новых алгоритмов локализации мобильного объекта, которые имеют меньшую вычислительную сложность или, при асимптотически такой же сложности, оказываются на практике более эффективными, т.е. выполняются быстрее.

Сформулированную выше задачу локализации мобильного объекта (ЛМО) можно классифицировать как детерминированную геометрическую оптимизационную задачу. Наряду с ней могут рассматриваться и другие актуальные формы постановки задачи ЛМО, например, такие как:

1. Стохастическая задача, включающая *оценивание* (фильтрацию) состояния объекта;
2. Кооперативная задача для группы объектов;
3. Одновременная локализация и составление объектом карты (SLAM).

В работе исследуется именно детерминированная геометрическая оптимизационная задача ЛМО, поскольку даже в такой формализации проблемы исследования и разработки эффективных методов, алгоритмов и программного обеспечения локализации мобильного объекта в настоящее время являются актуальными.

Целью диссертационной работы является разработка быстрых алгоритмов локализации мобильного объекта и их программных реализаций, исследование и анализ их эффективности (в первую очередь с точки зрения времени выполнения в сравнении с известными алгоритмами).

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения диссертационной работы решены следующие задачи:

1. Анализ методов и алгоритмов локализации мобильного объекта. Анализ сложности и сравнение реализаций алгоритмов ЛМО.
2. Формирование обобщенного алгоритма локализации мобильного объекта.
3. Разработка алгоритма генерации гипотез локализации с использованием триангуляции простого многоугольника.
4. Разработка алгоритмов локализации на основе систематического использования триангуляции простого многоугольника.
5. Разработка *реализации* алгоритмов локализации мобильного объекта:
 - I. Алгоритма с использованием декомпозиции карты на *ячейки видимости*.
 - II. Алгоритма, использующего *рандомизацию* при проверке гипотез.
 - III. Алгоритма на основе *триангуляции* карты.
 - IV. Алгоритма с использованием *окон* в многоугольнике карты.
6. Разработка алгоритма генерации модели карт плоской внешней среды, представленных простыми многоугольниками различных видов и размеров, в целях проведения моделирования и компьютерного исследования алгоритмов ЛМО.
7. Компьютерное исследование и сравнительный анализ реализаций алгоритмов ЛМО на множестве сгенерированных карт.

Объектом исследования являются математические модели, численные методы и компьютерные алгоритмы решения NP-трудной оптимизационной задачи локализации мобильного объекта, снабженного картой.

Предметом исследования являются модели и методы вычислительной геометрии и основанные на них приближенные оптимизационные алгоритмы, применяемые для решения задачи локализации мобильного объекта, повышение вычислительной эффективности алгоритмов и их программных реализаций, анализ и экспериментальное исследование алгоритмов ЛМО.

Методы исследования. Теоретическая часть работы выполнена на основе применения моделей, методов и алгоритмов вычислительной (алгоритмической) геометрии, комбинаторной оптимизации, теории сложности алгоритмов. В экспериментальной и практической частях работы применяются методы программирования, построения и анализа алгоритмов и программ, компьютерного исследования характеристик качества и моделирования работы алгоритмов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложен алгоритм построения скелета многоугольника видимости на основе триангуляции простого многоугольника, систематически используемый при решении задачи ЛМО и позволяющий уменьшить время вычисления.
2. Предложены два новых приближенных алгоритма для решения задачи локализации мобильного объекта, имеющие лучшие характеристики вычислительной эффективности в сравнении с известными алгоритмами:

- i.* Алгоритм локализации объекта с использованием триангуляции карты.
 - ii.* Алгоритм локализации объекта с использованием окон в многоугольнике карты.
3. Разработаны схемы (алгоритмы) генерации моделей внешней среды в виде плоской карты, представленной простыми многоугольниками различных форм и размеров, позволяющие проводить систематические испытания и анализ характеристик разработанных алгоритмов.
 4. Разработан комплекс программ, реализующий предложенные алгоритмы за время, существенно меньшее, чем в существующих прототипах.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке инструментария и технологии построения алгоритмов ЛМО на основе методов детерминированной геометрической оптимизации.

На защиту выносятся следующие основные результаты и **положения**:

1. Алгоритм построения скелета многоугольника видимости (относительно текущего положения объекта) на основе триангуляции многоугольника карты.
2. Приближённый алгоритм локализации мобильного объекта с систематическим использованием триангуляции карты.
3. Приближённый алгоритм локализации мобильного объекта с использованием окон в многоугольнике карты.
4. Математическая модель внешней среды в виде плоской карты, позволяющая проводить исследования разработанных алгоритмов.
5. Программные реализации алгоритмов локализации мобильного объекта, снабженного картой; программа компьютерного моделирования для сравнительного исследования алгоритмов (объем кода на C++ \approx 28000 строк).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 66-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Санкт-Петербург, январь-февраль 2013 г.), Всероссийской научной конференции по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2015, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 28-30 октября 2015), а также на Международной конференции Informational Conference Southeast Asian Open and Distance Learning in the 21st Century “ISODL”, 2012 г.

Достоверность научных положений и результатов работы, полученных с применением математического аппарата вычислительной геометрии и геометрической оптимизации, подтверждается результатами вычислительных экспериментов, результатами испытаний разработанных программных средств в условиях моделирования различных видов и разных размеров многоугольника карты.

Реализация и внедрение результатов. Теоретические и практические результаты работы использованы в учебном процессе кафедры МОЭВМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. По теме работы опубликованы 10 научных работ, среди которых 5 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в другом издании, 3 доклада на международных, всероссийских и межвузовских научно-технических конференциях, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с заключениями, выводов, изложена на 122 страницах машинописного текста, включает 79 рисунков, 13 таблиц, список литературы из 103 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определена область исследований, сформулированы цели и задачи диссертации, а также основные результаты, их научная и практическая значимость. Сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Представлена структура диссертационной работы.

В **первой главе** освещена проблема локализации мобильного объекта, которая состоит в определении координат объекта в системе отсчета, связанной с внешней средой. Объект снабжен картой внешней среды в виде плоского простого многоугольника P с n вершинами без отверстий. Мобильный объект помещен в заранее неизвестное место p в пределах P (см. рисунок 1). Для решения задачи локализации объект, во-первых, должен, обзревая свою окрестность и соотнося полученный многоугольник видимости $V = V(p)$ с картой, определить, является ли его начальное местоположение единственным. Затем на основании анализа многоугольников P и V объект должен сгенерировать множество H всех гипотез о своем возможном местоположении $p_i \in P$ таким образом, что область видимости в точке p_i конгруэнтна V . Далее объект должен определить свое истинное начальное местоположение, перемещаясь и обзревая окрестность, чтобы устранить все неправильные гипотезы о своем местоположении. При этом суммарная длина перемещений объекта должна быть минимальной.

На рис. 1 приведены: многоугольник карты P (слева), многоугольник видимости V (в центре) и два возможных начальных местоположения p_1 и p_2 (справа).

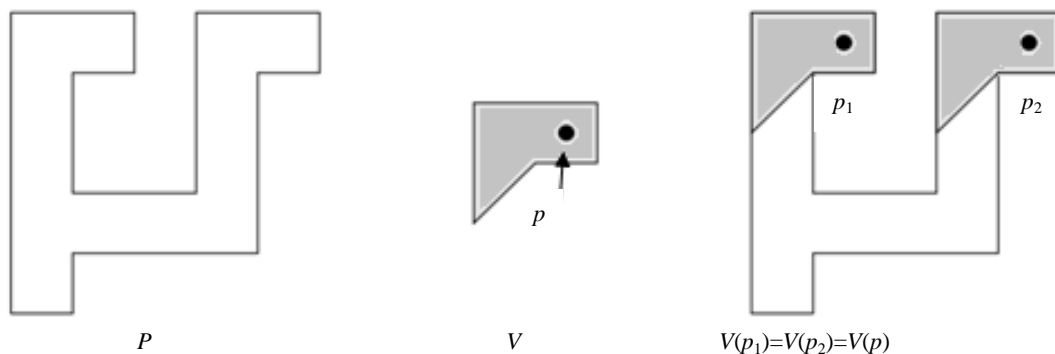


Рис. 1. Многоугольник карты P (слева), многоугольник видимости V (в центре) и два возможных начальных местоположения p_1 и p_2 (справа).

Известные алгоритмы локализации мобильного объекта включают две фазы: генерацию гипотез и проверку гипотез. В фазе генерации гипотез вычисляется множество гипотетических местоположений $H = \{h_1, h_2, \dots, h_k\}$, $(\forall i \in 1..k \mid h_i : p = p_i)$, которые соответствуют наблюдениям объекта в его начальном местоположении. В фазе проверки гипотез исключаются неправильные гипотезы. Оптимизационная задача локализации мобильного объекта является NP-трудной задачей. Далее рассматриваются три известных приближенных (полиномиальных) алгоритма локализации мобильного объекта:

1. Алгоритм 1 локализации объекта с использованием декомпозиции карты на ячейки видимости .

2. Алгоритм 2 , использующий рандомизацию при проверке гипотез .

3. Алгоритм локализации объекта на основе решения полугрупповой задачи Штейнера (далее в работе этот алгоритм не исследуется).

Во **второй главе** выделены основные подзадачи и приведен обобщенный алгоритм решения задачи, идеи анализа алгоритмов локализации мобильного объекта, необходимые

для этого элементы, алгоритм построения скелета многоугольника видимости на основе триангуляции, пересечения многоугольников и два новых приближённых алгоритма локализации мобильного объекта:

1. Алгоритм 3 локализации мобильного объекта с использованием триангуляции карты.
2. Алгоритм 4 локализации мобильного объекта с использованием окон в многоугольнике карты.

Сравнительные характеристики сложности этих алгоритмов приведены в табл.1.

Табл. 1. Сравнительные характеристики сложности этих алгоритмов

Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3	Алгоритм 4
Генерация гипотез $O(mn^2)$ для всех алгоритмов			
Разбиение карты на ячейки видимости – $O(n^5 \log n)$	Оверлейные пересечения относительно выбранной гипотезы – $O(f n \log n)$, где f - число остальных гипотез	Триангуляция многоугольника карты – $O(n \log^* n)$	Построение оверлейных пересечений относительно выбранной гипотезы – $O(k'n \log n)$, где k' - число активных гипотез
Анализ k ($k - 1$) ячеек для устранения гипотез – $O(k^2)$	Расчет прироста информации в случайных точках – $k O(Xfn)$, где X – количество точек	Построение оверлейных пересечений относительно выбранной гипотезы, k' - число активных гипотез – $O(k'n \log n)$	Построение «окон» связанного компонента оверлейного пересечения – $O(2k'n^2)$
Кратчайший путь при перемещении к границе очередной ячейки видимости – $k^4 O(n \log n)$	Кратчайший путь от «полезной» точки до начального местоположения – $kO(Yn \log n)$	Обследование $4k(n-2)$ точек на ребрах и центрах треугольников для устранения гипотез. Вычисление кратчайших путей для определения ближайших окон $k'O(n \log^* n) + 4k'(n-2)O(n) = k'O(n^2)$	Обследование $2k'n$ точек на серединах окон. Вычисление кратчайших путей для определения ближайших окон $k'O(n \log^* n) + 2k'nO(n) = k'O(n^2)$
Сравнение данных о видимости в парах точек – $k^3 O(n)$	Сравнение данных о многоугольниках видимости для активных гипотез и текущего положения объекта – $YO(n)$	Сравнение данных о многоугольниках видимости для активных гипотез и текущего положения объекта – $4k'(n-2)O(n)$	Сравнение данных о многоугольниках видимости для активных гипотез и текущего положения объекта – $2k'nO(n)$
Полная сложность – $O(n^5 \log n)$	Полная сложность – $O(n^3 \log n + X n^3)$	Полная сложность – $O(mn^2) + O(n \log^* n) + \sum_{k'=1}^{k-1} \begin{bmatrix} O(k'n \log n) \\ +k'O(n^2) \\ +4k'(n-2)O(n) \end{bmatrix} = O(n^4)$	Полная сложность – $O(mn^2) + \sum_{k'=1}^{k-1} \begin{bmatrix} O(k'n \log n) + \\ O(2k'n^2) + \\ k'O(n^2) + \\ 2k'nO(n) \end{bmatrix} = O(n^4)$

Пусть d – оптимальное значение суммарного пути перемещения объекта. Суммарный путь объекта, получающийся в приближенных алгоритмах, отличается от оптимального значения и принимает следующие значения: $(k - 1) d$ для алгоритма 1, где k – число гипотез;

$(1 + \varepsilon)(k - 1)d$ для алгоритма 2, где $0 < \varepsilon < 0.6$; $(k - 1)d$ - для алгоритма 3; $(k - 1)d$ - для алгоритма 4.

В третьей главе рассматриваются вопросы разработки программы решения и моделирования задачи локализации мобильного объекта.

Рассмотрены алгоритмы генерации различных видов и разных размеров карты, представленной в виде простого многоугольника, с помощью среды Visual C++ 2010, которая выбрана для разработки генерации карты.

Рассмотрены реализации четырёх приведенных выше алгоритмов локализации объекта:

1. Алгоритм 1 локализации объекта с использованием декомпозиции карты на ячейки видимости.
2. Алгоритм 2 локализации объекта, использующий рандомизацию при проверке гипотез.
3. Алгоритм 3 локализации объекта с использованием триангуляции карты.
4. Алгоритм 4 локализации объекта с использованием окон в многоугольнике карты.

В четвертой главе приведены результаты исследования алгоритмов локализации объекта на множестве сгенерированных карт.

Экспериментальное исследование основано на программной реализации алгоритмов 1, 2, 3 и 4 (Visual C++ 2010) и сравнении таких характеристик алгоритмов, как величина суммарного пути перемещения объекта и время работы алгоритма локализации. При проведении эксперимента использовалась генерация карт различных модельных типов. Примеры такой генерации (многоугольник карты в виде «ступенек») и работы алгоритма локализации приведены на рис. 2, 3, 4, 5.

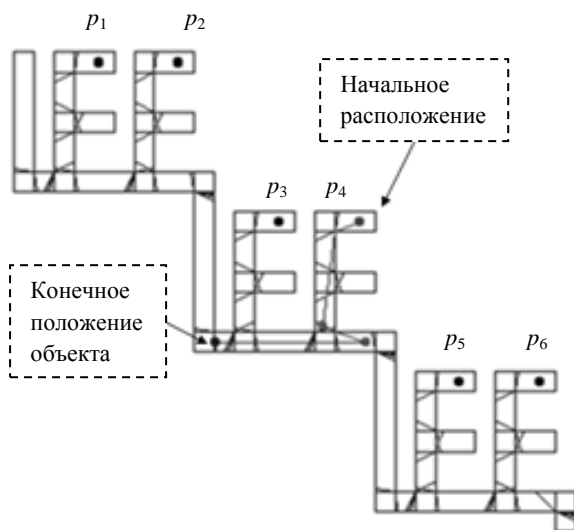


Рис. 2. Алгоритм 1 локализации объекта с использованием декомпозиции карты на ячейки видимости

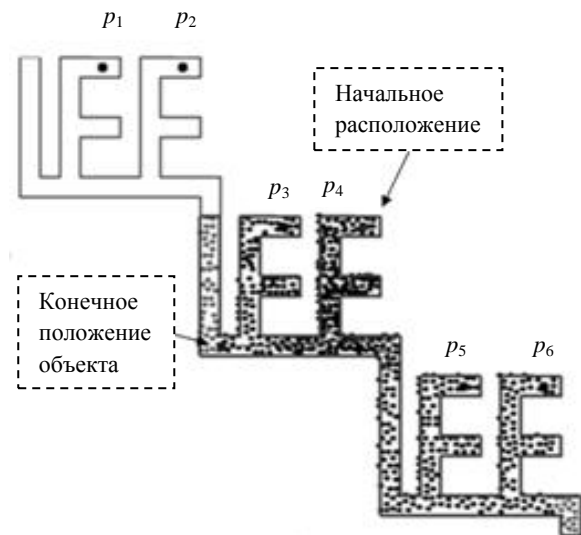


Рис. 3. Алгоритм 2 локализации объекта, использующий рандомизацию при проверке гипотез

На рис. 2 для сгенерированной модельной карты приведен результат работы алгоритма 1, использующего декомпозицию карты на ячейки видимости. Здесь карта при $n = 76$ имеет вид трех «ступенек» с размещенными на них ответвлениями и число гипотез $k = 6$.

Для сгенерированной модельной карты с теми же значениями k и n на рис. 3 приведен результат работы рандомизированного алгоритма 2, на рис. 4 – результат работы триангуляционного алгоритма 3, а на рис. 5 – результат работы алгоритма 4.

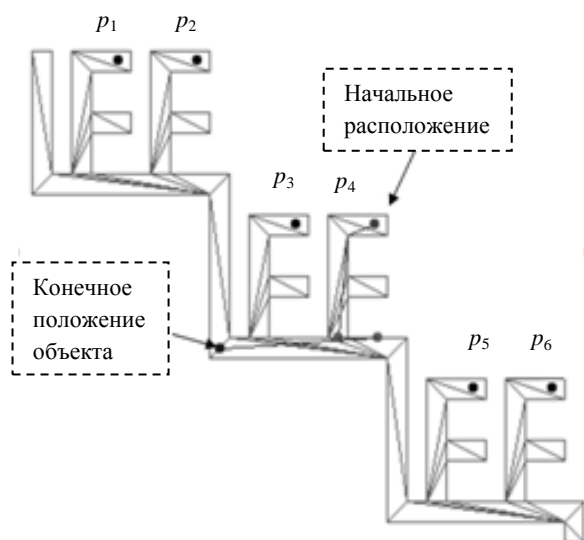


Рис. 4. Алгоритм 3 локализации объекта с использованием триангуляции карты

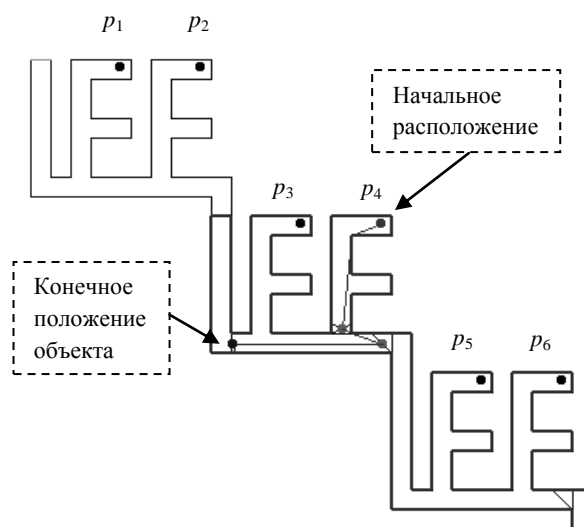


Рис. 5. Алгоритм 4 локализации объекта с использованием окон в многоугольнике карты

В таблице 2, 3 приведены результаты аналогичных экспериментов при размере многоугольника карты $n = 148$ (6 «ступенек») и числе гипотез $k = 12$. Здесь для четырёх приближённых алгоритмов локализации мобильного объекта указаны № – номер гипотезы (нумерация по 6 «ступенькам» слева направо и сверху вниз), d в таблице 2 – длина пути, пройденного объектом при локализации, а t в таблице 3 – время работы алгоритма. В рандомизированном алгоритме 2 были использованы 2 варианта для количества случайных точек : 2 при $X = 100$ и 2' при $X = 500$.

Табл. 2. Результаты экспериментов при размере многоугольника карты $n = 148$ (6«ступенек») и числе гипотез $k = 12$

№	d				
	Алгоритм 1	Алгоритм 2		Алгоритм 3	Алгоритм 4
		$X = 100$	$X = 500$		
1	52,8	52,2	51,3	58,2	52,4
2	118,0	114,4	113,8	111,1	109,9
3	269,6	268,3	266,8	274,1	264,0
4	547,3	539,4	546,8	541,0	530,3
5	910,7	916,9	904,5	916,8	897,6
6	920,8	977,2	911,3	915,4	899,9
7	911,6	930,6	905,5	916,8	897,2
8	917,9	934,7	910,8	916,3	900,9
9	536,1	558,6	531,3	543,1	526,7
10	277,3	283,5	274,0	274,4	266,7
11	105,9	105,4	106,8	113,4	106,2
12	61,9	64,6	61,1	57,6	56,9

Табл. 3. Результаты экспериментов при размере многоугольника карты $n = 148$ (6«ступенек») и числе гипотез $k = 12$

№	t, c				
	Алгоритм 1	Алгоритм 2		Алгоритм 3	Алгоритм 4
		$X = 100$	$X = 500$		
1	201,5	27,0	36,8	23,9	4,5
2	249,5	38,6	68,7	41,8	6,8
3	297,6	46,6	108,9	61,8	7,3
4	347,5	58,0	144,4	82,9	9,0
5	384,5	66,3	172,8	99,7	9,4
6	403,0	66,5	173,1	100,5	10,1
7	453,4	67,0	175,0	98,4	8,8
8	461,9	66,4	174,8	100,5	9,5
9	683,3	57,4	144,4	82,1	8,0
10	486,2	47,4	102,8	63,8	7,6
11	473,7	38,7	66,0	44,8	5,8
12	399,8	27,1	36,5	26,5	4,8

Для сравнения результатов эксперимента определим средние по зафиксированным значениям d и t . Например, $\bar{d} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} d_i$ и $\bar{t} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} t_i$.

На рис. 6 приведен график средней длины пути как функции от размера карты n , а на рис. 7 – среднего времени \bar{t} работы алгоритма как функции от размера карты n .

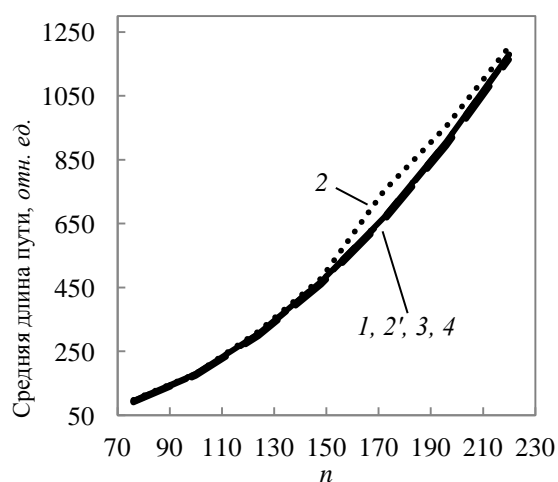


Рис. 6. График средней длины пути

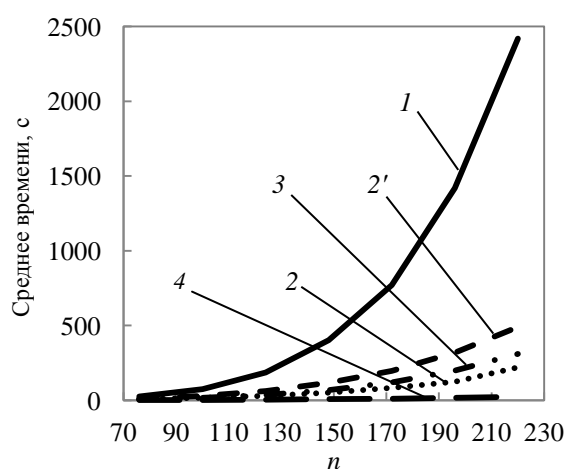


Рис. 7. График среднего времени работы

Различные типы линий графиков на рис. 6-7, соответствуют алгоритмам. 1 – алгоритму 1; 2 – алгоритму 2 при $X = 100$; 2' – алгоритму 2 при $X = 500$; 3 – алгоритму 3; 4 – алгоритму 4.

Сравнительный анализ данных, соответствующих рис. 6 - 7 показывает следующее.

1. Значения среднего пути для всех четырех алгоритмов очень близки. Например, для случая $n = 148$, соответствующего табл. 2, имеем:

$$\bar{d}_1 = 469,16; \bar{d}_2/\bar{d}_1 = 1,021; \bar{d}_{2'}/\bar{d}_1 = 0,99; \bar{d}_3/\bar{d}_1 = 1,001; \bar{d}_4/\bar{d}_1 = 0,97;$$

где нижние индексы соответствуют номерам алгоритмов, а для алгоритма 2 использован индекс 2 при $X = 100$ и индекс 2' при $X = 500$.

2. Самое большое время показывает алгоритм 1. Например, для случая $n = 148$, соответствующего табл. 3, имеем:

$$\bar{t}_1 = 403,49 \text{ с; а } \bar{t}_2/\bar{t}_1 = 0,12; \bar{t}_{2'}/\bar{t}_1 = 0,29; \bar{t}_3/\bar{t}_1 = 0,17; \bar{t}_4/\bar{t}_1 = 0,02;$$

т.е. алгоритмы 2, 3 и 4 выполняются существенно быстрее.

Проведенные эксперименты подтвердили тот факт, что рассматриваемые алгоритмы выполняются за весьма осязаемое время. Применение алгоритма 1 для оперативного решения задачи локализации объекта при больших значениях n , видимо, нецелесообразно. Алгоритмы 2, 3 и 4 работают на порядок быстрее. При этом в рассмотренных экспериментальных ситуациях предлагаемые алгоритмы 3 и 4 обеспечивают точность, сравнимую с другими алгоритмами, и имеют хорошие временные характеристики.

При проведении эксперимента использовалась генерация карт различных модельных типов. Пример такой генерации и работы алгоритма локализации с использованием окон карты приведен на рис. 8. Здесь размер карты $n = 746$, а число гипотез $k = 7$.

В таблице 4 приведены численные результаты эксперимента для этих значений параметров $n = 746$ и $k = 7$. Здесь для трёх приближённых алгоритмов локализации мобильного объекта (алгоритм 2 – алгоритм локализации мобильного объекта (АЛМО) с использованием рандомизации при проверке гипотез, алгоритм 3 – АЛМО с использованием триангуляции карты и алгоритм 4 – АЛМО с использованием окон в многоугольнике карты) указаны № – номер гипотезы (в соответствии с нумерацией на рис. 2), d – длина пути, пройденного объектом при локализации, и t – время работы алгоритма. В рандомизированном алгоритме 2 были использованы 2 варианта для количества случайных точек : 2 при $X = 100$ и 2' при $X = 500$.

Табл. 4. Численные результаты эксперимента для этих значений параметров $n = 746$ и $k = 7$

$n = 746$								
№	d , отн. ед.				t , с			
	Алгоритм 2		Алгоритм 3	Алгоритм 4	Алгоритм 2		Алгоритм 3	Алгоритм 4
	$X = 100$	$X = 500$			$X = 100$	$X = 500$		
1	529,2	504,9	464,9	500,5	788,5	2890,0	1800,2	273,6
2	266,0	225,1	303,9	220,2	683,8	2462,1	1653,1	230,0
3	113,5	76,4	90,2	69,3	499,2	1694,3	1145,9	178,2
4	520,1	457,5	461,6	499,9	808,6	2409,2	1843,7	278,1
5	117,0	96,8	91,2	70,3	459,5	1665,0	1083,0	178,0
6	235,9	172,4	92,7	175,5	519,6	2364,6	973,8	186,5
7	245,5	240,4	302,1	175,5	494,3	2709,4	1560,9	190,3

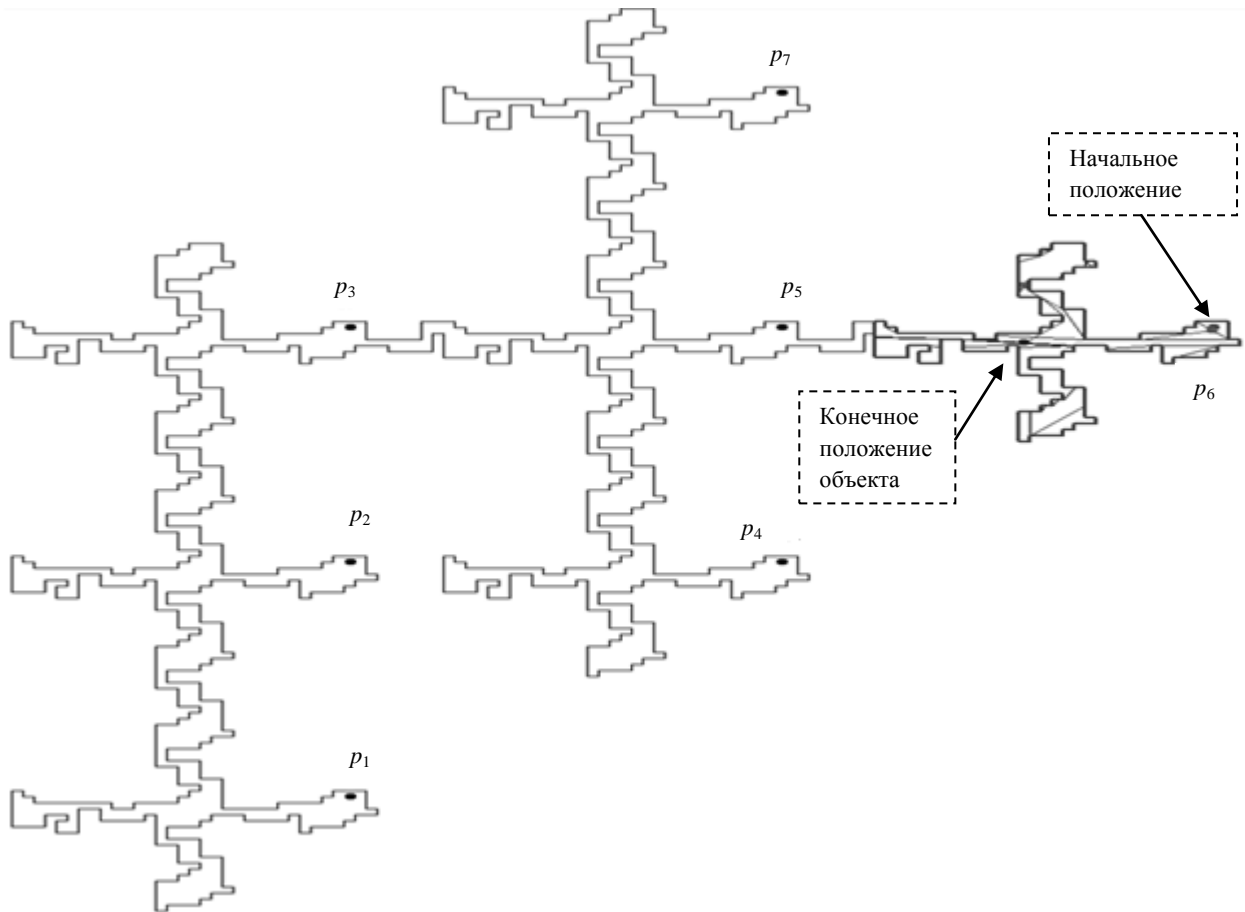


Рис. 8. Пример такой генерации и работы алгоритма локализации с использованием окон карты. Здесь размер карты $n = 746$, а число гипотез $k = 7$.

Для сравнения результатов эксперимента определены средние по зафиксированным значениям d и t : $\bar{d} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 d_i$, $\bar{t} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 t_i$, $s_i^{(2,4)} = \frac{d_i^{(2)}}{d_i^{(4)}}$, $s_i^{(2',4)} = \frac{d_i^{(2')}}{d_i^{(4)}}$, $s_i^{(3,4)} = \frac{d_i^{(3)}}{d_i^{(4)}}$, $s_i^{(2,4)} = \frac{t_i^{(2)}}{t_i^{(4)}}$, $s_i^{(2',4)} = \frac{t_i^{(2')}}{t_i^{(4)}}$, и $s_i^{(3,4)} = \frac{t_i^{(3)}}{t_i^{(4)}}$.

В таблице 5 приведены численные отношения s_i .

Табл. 5. Численные отношения s_i .

$n = 746$						
№	d , отн. ед.			t , с		
	$s_i^{(2,4)} = \frac{d_i^{(2)}}{d_i^{(4)}}$	$s_i^{(2',4)} = \frac{d_i^{(2')}}{d_i^{(4)}}$	$s_i^{(3,4)} = \frac{d_i^{(3)}}{d_i^{(4)}}$	$s_i^{(2,4)} = \frac{t_i^{(2)}}{t_i^{(4)}}$	$s_i^{(2',4)} = \frac{t_i^{(2')}}{t_i^{(4)}}$	$s_i^{(3,4)} = \frac{t_i^{(3)}}{t_i^{(4)}}$
1	1,06	1,01	0,93	2,88	10,56	6,58
2	1,21	1,02	1,38	2,97	10,70	7,19
3	1,64	1,10	1,30	2,80	9,51	6,43
4	1,04	0,92	0,92	2,91	8,66	6,63
5	1,66	1,38	1,30	2,58	9,35	6,08
6	1,34	0,98	0,53	2,79	12,68	5,22
7	1,40	1,37	1,72	2,60	14,24	8,20
$\bar{s}^{(l,1)} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 s_i^{(l,1)}$	1,34	1,11	1,15	2,79	10,82	6,62

Различные типы линий графиков на рис. 9-10, соответствуют отношениям: 2 – отношению $\bar{s}^{(2,4)}$; 2' - отношению $\bar{s}^{(2',4)}$; 3 - отношению $\bar{s}^{(3,4)}$; 4 - отношению $\bar{s}^{(4,4)}$.

На рис. 9 приведен график среднего отношения длины пути как функции от размера карты n . На рис. 10 приведен график среднего отношения времени \bar{t} работы алгоритма как функции от размера карты n . Сравнительный анализ данных, соответствующих рис. 9-10 показывает следующее.

1. Значения среднего пути для алгоритмов 4, 2' при $X = 500$ и 3 очень близки, а для алгоритма 2 при $X = 100$ несколько больше. Например, для случая $n = 746$, соответствующего табл.5, имеем:

$$\bar{d}_4 = 244,46; \bar{d}_2/\bar{d}_4 = 1,34; \bar{d}_{2'}/\bar{d}_4 = 1,11; \bar{d}_3/\bar{d}_4 = 1,15;$$

где нижние индексы соответствуют номерам алгоритмов, а для алгоритма 2 использован индекс 2 при $X = 100$ и индекс 2' при $X = 500$.

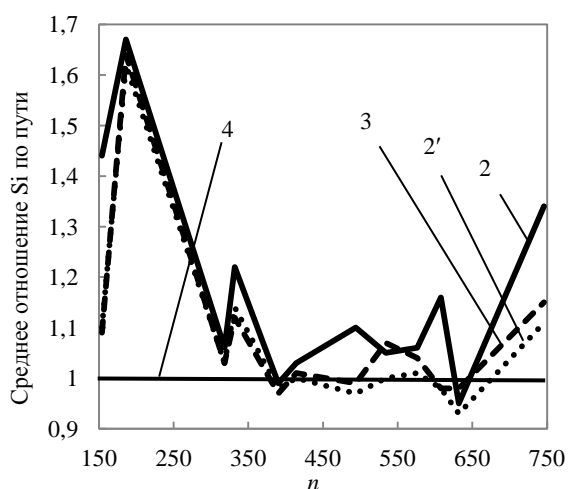


Рис. 9. График среднего отношения длины пути

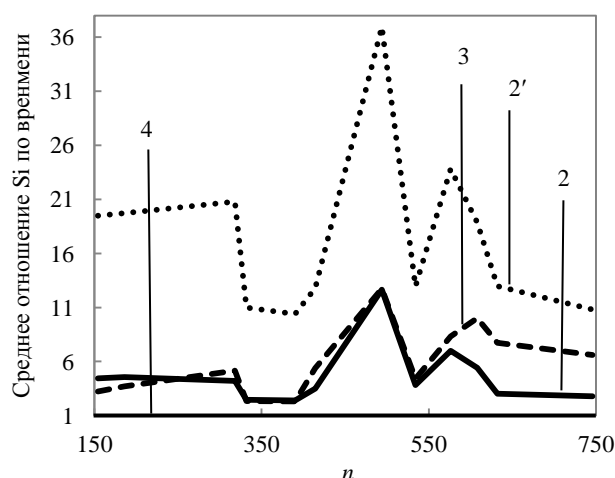


Рис. 10. График среднего отношения времени \bar{t} работы алгоритма

2. Самое большое время показывает алгоритм 2'. При $n = 746$, например,

$$\bar{t}_4 = 216,39 \text{ с}; \text{ а } \bar{t}_2/\bar{t}_4 = 2,79; \bar{t}_{2'}/\bar{t}_4 = 10,82; \bar{t}_3/\bar{t}_4 = 6,62;$$

т.е. алгоритмы 2, 3 и 4 выполняются существенно быстрее.

Проведенные эксперименты с другими модельными конфигурациями карты показали аналогичные результаты и позволяют сделать вывод, что все рассмотренные алгоритмы обеспечивают сравнимую точность, но время работы алгоритма 4 меньше других алгоритмов.

Для анализа эффективности предложенных алгоритмов проводилось экспериментальное исследование, основанное на их программной реализации (Visual C++ 2010) и сравнении таких их характеристик, как величина суммарного пути перемещения объекта и время работы алгоритма локализации. Ранее было установлено, что алгоритм 2, использующий рандомизацию при проверке гипотез, более эффективен, чем алгоритм 1, использующий декомпозицию карты на ячейки видимости и имеющий асимптотическую сложность $O(n^5 \log n)$, а также более эффективен, чем алгоритм, основанный на решении полугрупповой задачи Штейнера и имеющий вычислительную сложность $O(n^{12})$. Поэтому далее приводится сравнение именно с алгоритмом 2. На алгоритмы, участвовавшие в эксперименте, будем ссылаться, обозначив их для краткости цифрами: 2 - алгоритм локализации мобильного объекта (АЛМО) с использованием рандомизации при проверке гипотез (число точек, случайным образом размещаемых в исследуемой области, $X = 100$); 2' – тот же АЛМО с

использованием рандомизации при проверке гипотез, но число точек, случайным образом размещаемых в исследуемой области, $X = 500$; 3 – АЛМО с использованием триангуляции карты; 4 – АЛМО с использованием окон в многоугольнике карты. При проведении эксперимента использовалась генерация карт различных модельных типов. Генерация осуществлялась по нескольким задаваемым шаблонам: первый из них задает общую укрупненную схему карты в виде регулярного дерева, вершины которого соответствуют фрагментам карты «комната» или «коридор», для которых в свою очередь задаются свои шаблоны. Сочетание параметров, задающих размеры шаблонов, определяет общий размер карты n , и при такой генерации его числовое значение можно регулировать, как правило, лишь приближенно. На рис. 11 приведен пример генерации карты размера $n = 746$ и с числом гипотез $k = 7$ при любом из обозначенных на рисунке начальных положений p_i ($i=1..7$).

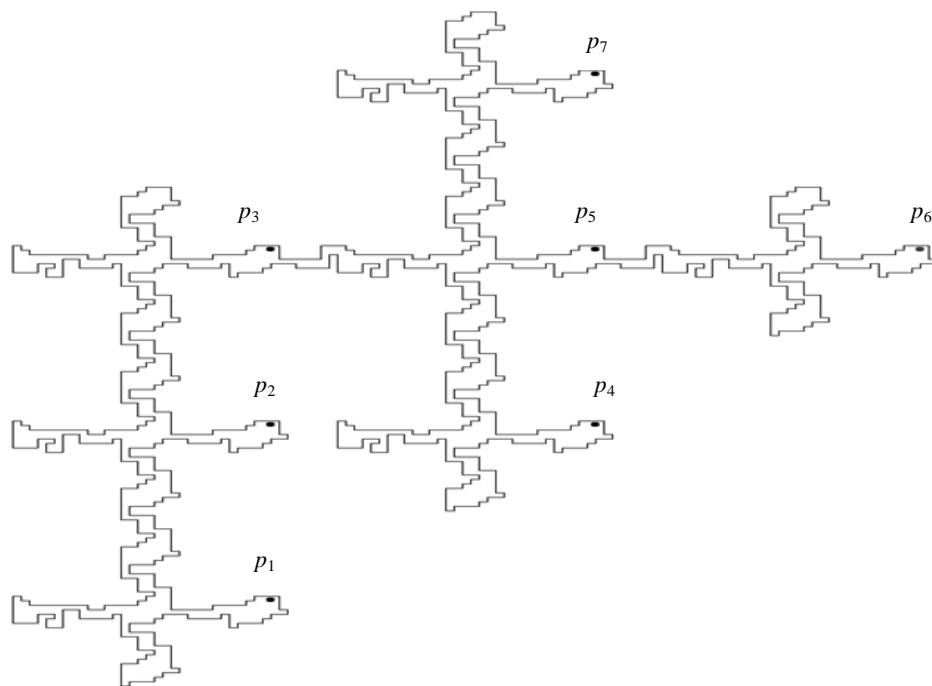


Рис.11. Пример генерации карты. Здесь размер карты $n = 746$, а число гипотез $k = 7$ для любого из обозначенных положений объекта.

Предварительный анализ показал, что полученные характеристики алгоритмов (длина пути d , пройденного объектом до окончания локализации, и время t работы алгоритма локализации) существенно зависят от начального расположения объекта (от номера гипотезы). По этой причине целесообразно усреднять по гипотезам не сами характеристики, полученные для разных алгоритмов, а их отношения, которые и будут характеризовать сравнительную эффективность алгоритмов. Выберем характеристики алгоритма с триангуляцией (номер алгоритма 3) в качестве «эталона» для сравнения, т.е. для алгоритмов (с номером a) будут вычислены (здесь i – номер гипотезы)

$$s_i^{(a)} = \frac{x_i^{(a)}}{x_i^{(3)}}, \text{ где } x = d \text{ или } x = t.$$

Усреднением по k гипотезам получим $\bar{s}^{(a)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i^{(a)}$. При этом $\bar{s}_i^{(3)} = 1$ и $\bar{s}^{(3)} = 1$.

В таблице 6 приведены значения отношений $\bar{s}^{(a)}$ для конфигурации, изображенной на рис. 11.

Характеристика (x)	Номер алгоритма			
	3	2	2'	4
Длина пути	1	1,16	0,98	0,85
Время локализации	1	41,9	117,1	17,5

Алгоритм 3 на основе триангуляции показывает здесь значительно лучшее время, но при этом дает несколько большую длину пути, чем алгоритм с рандомизацией в варианте 2', и чем лучший по этому показателю алгоритм 4. Аналогичные соотношения получены и на других конфигурациях карты.

На рис. 11 и 12 приведены графики зависимостей средних значений указанных отношений от размера многоугольника карты n . Различные типы линий графиков на рис. 11-13 относятся к алгоритмам с соответствующими номерами.

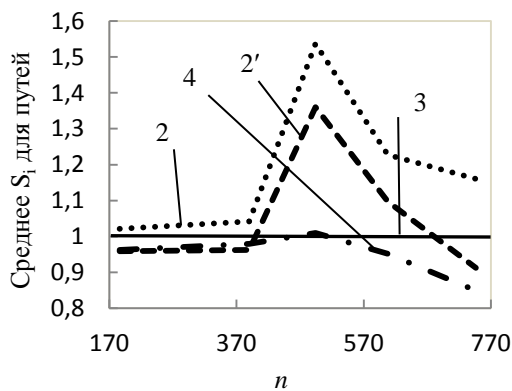


Рис. 11. Зависимость средних значений для отношений длин путей

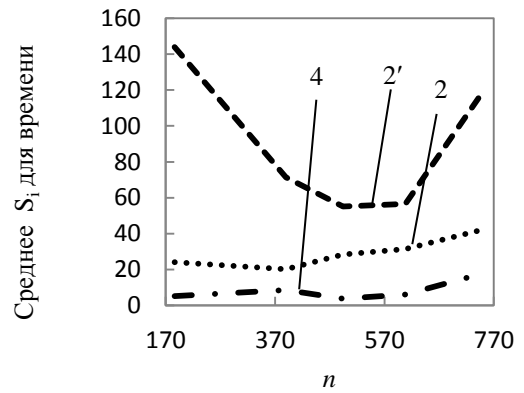


Рис. 12. Зависимость средних значений для отношений времени работы алгоритмов

На рис. 13 показана увеличенная часть рис. 12 (данные алгоритма 2' находятся выше на графике и не попадают в область рис. 13).

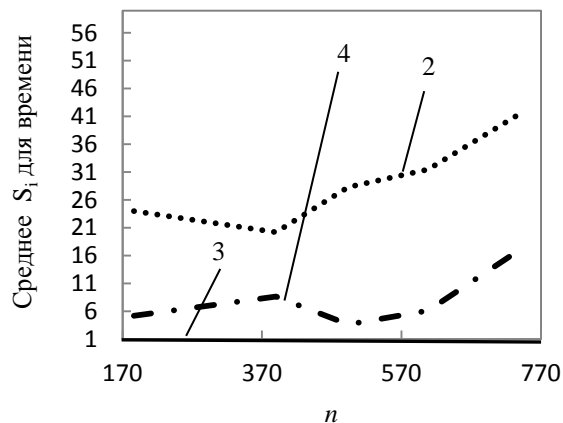


Рис. 13. Зависимость средних значений для отношений времени работы алгоритмов (укрупненный вид)

Данные на этих рисунках показывают (более наглядно на рис. 13), что в приведенном диапазоне значений размера карты n алгоритм 3 показывает значительно меньшее время работы, а вторым по времени работы оказывается алгоритм 4.

Проведенные эксперименты с другими модельными конфигурациями карты показали аналогичные результаты и позволяют сделать вывод, что рассмотренные приближенные алгоритмы ЛМО обеспечивают сравнимую точность, но время работы двух алгоритмов ЛМО с использованием триангуляции карты и с использованием окон в многоугольнике карты меньше, чем время работы других. При этом лучшие по времени результаты показывает алгоритм на основе триангуляции карты.

В таблице 7 приведены значения отношений $\bar{s}^{(a)}$ для конфигурации, изображенной на рис. 14.

Табл. 7

Характеристика (x)	Номер алгоритма			
	3	2	2'	4
Длина пути	1	1,57	1,01	1,63
Время локализации	1	17,1	26,7	26,9

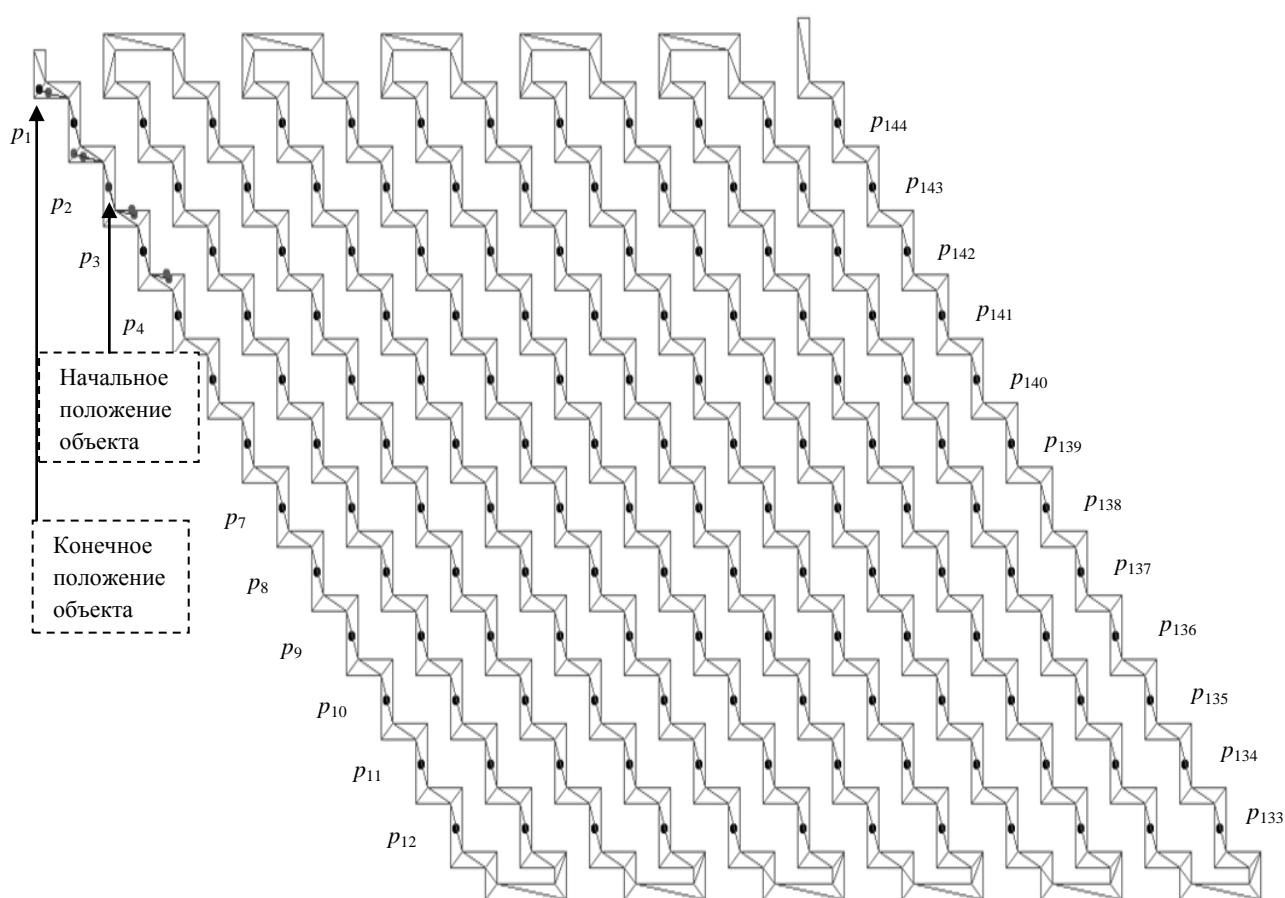


Рис. 14. Пример генерации карты. Здесь размер карты $n = 672$, а число гипотез $k = 144$ для любого из обозначенных положений объекта.

Алгоритм 3 на основе триангуляции показывает здесь значительно лучшее время, но при этом дает несколько большую длину пути, чем алгоритм с рандомизацией в варианте 2'. Аналогичные соотношения получены и на других конфигурациях карты. На рис. 15 и 16 приведены графики зависимостей средних значений указанных отношений от размера n многоугольника карты. Различные типы линий графиков на рис. 15 - 16 относятся к алгоритмам с соответствующими номерами.

Данные на этих рисунках показывают, что в приведенном диапазоне значений размера карты n алгоритм 3 показывает значительно меньшее время работы, а вторым по времени работы оказывается алгоритм 2.

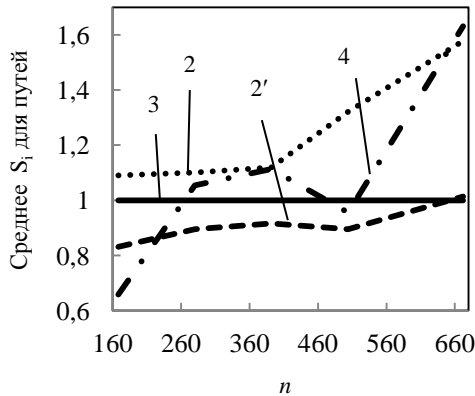


Рис. 15. Зависимость средних значений для отношений длин путей

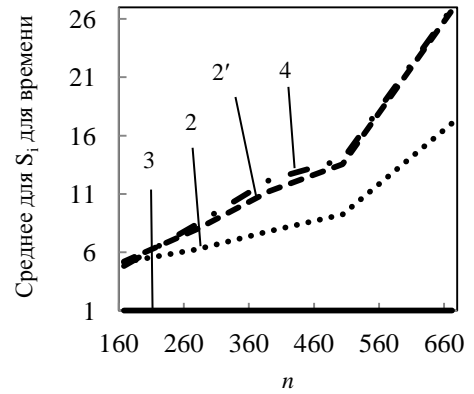


Рис. 16. Зависимость средних значений для отношений времени работы алгоритмов

Проведенные эксперименты с другими модельными конфигурациями карты показали аналогичные результаты и позволяют сделать вывод, что рассмотренные модификации приближенных алгоритмов ЛМО обеспечивают сравнимую точность, но время работы двух модифицированных алгоритмов ЛМО с использованием триангуляции карты и с использованием окон в многоугольнике карты меньше, чем время работы других. При этом значительно лучшие по времени результаты показывает алгоритм 3, систематически использующий триангуляцию карты. Этот результат отличается от ранее полученного по исходным (не модифицированным) версиям алгоритмов, использующих триангуляцию, где лучшие результаты показывал алгоритм 2.

В заключении сформулированы основные результаты, достигнутые в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Предложен алгоритм построения скелета многоугольника видимости на основе триангуляции, систематически используемый при решении задачи ЛМО и позволяющий уменьшить время вычисления.

2. Предложен и исследован приближенный алгоритм локализации мобильного объекта с систематическим использованием триангуляции карты, основанный на алгоритме по п.1 и обеспечивающий увеличение эффективности вычислений в $n \log n$ раз и более по сравнению с известными алгоритмами (n – “размер” карты).

3. Предложен и исследован приближенный алгоритм локализации мобильного объекта с использованием окон в многоугольнике карты, основанный на алгоритме по п.1 и обеспечивающий увеличение эффективности вычислений в $n \log n$ раз и более по сравнению с известными алгоритмами (n – “размер” карты).

4. Проведены анализ и настройка алгоритмов генерации карты, представленной в виде простого многоугольника различных моделей и размеров.

5. Разработано программное обеспечение решения и моделирования задачи локализации мобильного объекта.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Дао Зуй Нам, Ивановский С.А. Экспериментальный анализ алгоритмов локализации мобильного робота // Известия СПбЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 1, С. 19-24.
2. Дао Зуй Нам, Ивановский С.А. Приближенный алгоритм локализации мобильного робота с использованием окон в многоугольнике карты // Известия СПбЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 3, С. 38-43.
3. Дао Зуй Нам, Ивановский С.А. Приближённые алгоритмы локализации мобильного робота// Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2014. № 2, С. 109-121.
4. Дао Зуй Нам, Фирсов М. А. Использование триангуляции многоугольников в задаче локализации мобильного робота // Компьютерные инструменты в образовании. 2014. № 5, С. 25-41.
5. Дао Зуй Нам, Ивановский С.А. Оптимизация алгоритма локализации мобильного робота с использованием триангуляции карты // Известия СПбЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 2, С. 26-32.

Другие статьи и материалы конференций:

6. Ivanovskii Sergei , Dao Duy Nam, Visualization algorithms for distance and blended learning (Визуализация алгоритмов в системе дистанционного обучения) // Informational Conference Southeast Asian Open and Distance Learning in the 21st Century “ISODL” 2012, P. 95-105.
7. Дао Зуй Нам. Сравнительный анализ алгоритмов локализации мобильного робота, использующего карту// Сб. тр. 66-й науч.-техн. конф. проф.-преп. состава СПбЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2013. С. 112-115.
8. Dao Duy Nam, S.A. Ivanovskiy. Two new approaches to minimum distance localization (Два новых подхода для задачи локализации с минимальным расстоянием) // Journal of science and technology University of Danang, No. 12,(73), 2013, P. 52-57.
9. Дао Зуй Нам, Ивановский С.А. Алгоритмы управления мобильным роботом в задаче локализации при заданной карте внешней среды // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах “ПУТС” 2015. С. 85-89.

Зарегистрированные программы

10. Дао Зуй Нам. Программа решения и моделирования задачи локализации мобильного робота, снабженного картой // Программа для ЭВМ // RU ОБПБТ 12.5.2014, Свидетельство № 2014614898.