

one-dimensional, i.e. admitting their direct comparison. This feature greatly complicates the task of decision-making for a decision-maker, or a group of persons who make such decisions. As a result, there is an objective necessity for the development and/or comparison of mathematical models and decision support methods of computer decision-making systems using multi-criteria evaluation methods.

The comparison in 7-dimensional feature space has shown that the most advantageous method for the analysis of complex mobile systems is the analytic hierarchy process which allows establishing relations both between the levels of criteria and the preferences of the experts for each alternative. Application of the developed rating scale allows processing of difficult-to-measure data.

**Key words:** multi-criteria selection, alternative, decision-making

\*\*\*

## Reference

1. Trahtengerc Je.A. Komp'yuternaja podderzhka prinjatija reshenij. M.: SINTEG, 1998. – 376 s.

2. Bomas V.V., Sudakov V.A., Afonin K.A. Podderzhka prinjatija mnogokriterial'nyh reshenij po predpochtenijam pol'zovatelja. SPPR DSB/UTES / pod red. V.V. Bomasa. – M.: Izd-vo MAI, 2006. – 172 s.

3. Lotov A.V., Pospelova I.I. Mnogokriterial'nye zadachi prinjatija reshenij. Metod dostizhimyh celej. – M.: MAKS Press, 2008. – 197 s.

4. Andrejchikov A.V., Andrejchikova O.N. Sistemnyj analiz strategicheskikh reshenij v innovatike. Matematicheskie, jevrsticheskie i intellektual'nye metody sistemnogo analiza i sinteza innovacij. – M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2013. – 304 s.

5. Saati T. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij. – M.: Radio i svjaz', 2003. – 320 s.

6. Mironova, N. A. Integracija modifikacij metoda analiza ierarhii dlja sistem podderzhki prinjatija gruppovyh reshenij // Radioelektronika, informacija, upravlenie. – 2011. – №2. – S.47-54.

7. Grivachev A.V., Emel'janov S.G., Borodin M.V. Strukturno-funkcional'naja shema raspoznavanija i ocenki riska v sisteme upravlenija robotizirovannymi mnogofunkcional'nyh mashinami // Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy. – 2015. – T.13, N6. – S. 4 - 9.

8. Kurochkin A.G., Emel'janov S.G., Titenko E.A. Analiz algoritmov poiska po obrazcu dlja upravlenija gruppoj robotov // Naukoemkie tehnologii. – 2014. – T.15, N 12. – S. 4-8.

9. Storubev M.L. Mnogokriterial'nyj vybor upravljajushhix parametrov processov sistem menedzhmenta s uchetom znachimosti kriteriev ih ocenki // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2015. – №4 (61). – S. 54- 59.

УДК 004.896:621.865

**А.Г. Курочкин**, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: dk.kursk@gmail.ru)

**Е.А. Титенко**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: johntit@mail.ru)

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ СГЛАЖИВАНИЯ ТОЧЕК МАРШРУТА

В работе рассматривается вопрос линеаризации ломанной, состоящей из точек маршрута. Показаны ограничения классического алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера. Эти ограничения важны для робота при расходе ресурсов и удержания скорости на местности. Они состоят в использовании таких опорных точек ломанной, которые имеют наибольшими значения отклонений координат между первой и последней точками. В этом случае траектория движения робота сглаживается, но углы поворота остаются большими. Тогда робот должен останавливаться в опорных точках и поворачиваться по курсу.

Это действие увеличивает общее время прохождения маршрута. В связи с этим нельзя непосредственно использовать этот алгоритм для выравнивания движения подвижного робота.

Для этого в алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера введен этап предобработки, включающий сбор данных о количественных характеристиках промежуточных точек исходной ломанной. Учет этих характеристик позволяет объективно выделять точки ломанной, понимаемые как шум. В противоположность исходному алгоритму опорные точки с большим значением координат исключаются из рассмотрения. Для этого анализируются отклонения всех точек между первой и последней. Наблюдается статистика для данной ломанной. На основе заданных пользователем предельных отклонений определяются тоски, которые будут пониматься как шум. В результате полученная ломанная имеет меньший размах между точками. Количество точек в ломанной уменьшается. Эти преобразования обеспечивают лучшие ходовые характеристики для подвижного робота.

**Ключевые слова:** ломанная, аппроксимация, отклонения, подвижный робот.

\*\*\*

## Введение

С вычислительно-мехатронной точки зрения робототехническая машина (РТМ) представляются дискретными исполнителями, имеющими память действий и осуществляющих плановые и немонотонные движения по двух-, трехмерной цифровой карте местности (ЦКМ). С одной стороны, деятельность интеллектуальных машин опирается на планируемые действия, в том числе детерминированно вычисляемые значения (обороты двигателей, координаты машины, управление приводом, расход топлива, координаты цели и др.). С другой стороны, достижение целевой позиции связывается с немонотонным характером действий интеллектуальных машин, проявляющимся в автономных перемещениях машин в текущей обстановке, и выполнении при этом значительного объема вычислений входных изображений объектов, собственных позиций, позиций цели и препятствий, картографических трехмерных сцен [1].

Траектория движения робота является результатом алгоритма планирования точек местности с учетом ограничений. Вместе с тем, взаимные положения точек маршрута существенным образом влияют на расход ресурсов и время прохождения маршрута. Действительно, на прямолинейных участках управление роботом

проще, робот может развивать максимальную скорость. В связи с этим представляется актуальным развитие алгоритмов сглаживания точек траектории. Под сглаживанием далее будет пониматься уменьшение точек с сохранением общего портрета участков движения.

## Алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера

В робототехнике классический алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера применяется для линеаризации движения робота с учетом препятствий и возможных участков маршрута их обхода. Также данный алгоритм может применяться для исключения ошибочных измерений параметра средствами сканирования/измерения различной природы. В первую очередь речь идет об измерении движущимся РТМ расстояний до объектов на пересеченной местности. Ошибочное отражение лазерного луча от внешнего объекта, искажение изображения из-за угла смещения РТК, случайное или целенаправленное воздействие помех приводят к разбросу измеряемого значения и как следствие – к необходимости выделения информативных точек в исходном множестве. С теоретической точки зрения количество измеряемых данных не является ограничением алгоритма. С практической точки зрения речь идет о размерности исходного множества количеством 10-16 точек.

Классический алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера применяется для обработки множества точек, аппроксимированных ломанной, проходящей через подмножество базовых (опорных) точек исходного множества [2]. Исходное множество точек - это результат измерения параметра с учетом возможных погрешностей и ошибок. Большая размерность исходного множества точек является избыточной.

Для повышения оперативности обработки интерес представляют только информативные точки, задающие градиент изменения параметра по отношению к соседним значениям. Алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера реализует сглаживание исходной многозвенной кусочно-линейной кривой с меньшим количеством точек, т.е. алгоритм осуществляет упрощенную аппроксимацию [2]. Точки, вошедшие в конечную кусочно-линейную аппроксимированную кривую, считаются информативно-значимыми (опорными) точками. Точки, не вошедшие в конечную кривую, получили название «выколотые». Их пропуск не изменяет градиент перемещения по кривой между соседними точками.

Исходное множество точек представляется списком, а многозвенная ломанная – векторами, последовательно соединяющими две соседние точки. Позиции (координаты) первой и последней точек сохраняются неизменными. Позиции всех точек, расположенных между ними, подлежат анализу и обработке на предмет их включения в состав подмножества информативно-значимых (опорных) точек.

Аппроксимация осуществляется с заданной точностью  $\varepsilon$  ( $\varepsilon > 0$ ). Точность соотносится с величиной перпендикуляра (отклонения) до прямой, соединяющей граничные (первую и последнюю) точки

ломанной. В частности, если значение отклонения меньше предела точности, то такая точка располагается в коридоре погрешности, т.е. является несущественной. Ее исключение из исходного множества не изменяет градиента между соседними точками. С другой стороны, если значение отклонения больше предела точности, то позиция такой точки оказывает значимое влияние на градиент перемещения между соседними точками. Данную точку следует сохранить как информативно-значимую. Тем не менее, в такой интерпретации алгоритм сглаживания не применяется: наперед заданное значение точности  $\varepsilon$  ( $\varepsilon > 0$ ) никак не связано с фактическими отклонениями точек.

В результате классический алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера предваряется этапом вычисления максимального отклонения, определения характеристик такой точки (индекс, координаты, знак отклонения.).

Основу вычисления определяет шаг поиска точки с максимальным отклонением. Далее алгоритм рекурсивно делит многозвенную ломанную на части. Для этого применяются следующие 2 правила:

а) если  $b_{\max} < \varepsilon$ , то все точки, у которых  $\text{index} < \text{index}_{\max}$ , исключаются из подмножества опорных точек, а получившаяся прямая между первой и точкой с индексом  $\text{index}_{\max}$  сглаживает кривую с точностью не ниже  $\varepsilon$ . Далее за первую точку принимается найденная опорная точка, имеющая  $\text{index}_{\max}$ . Процесс сглаживания начинается заново, включая шаг поиска новой точки с максимальным отклонением;

б) если  $b_{\max} > \varepsilon$ , то алгоритм рекурсивно вызывает себя на 2 наборах:

– набор от первой точки множества до точки с индексом  $\text{index}_{\max}$  ;

– набор от точки с индексом  $index_{max}$  до последней точки множества (данная точка будет отмечена как опорная).

Визуализация 5 шагов работы классического алгоритма приведена на рис. 1. В результате достигнуто 50% сокращение точек ломанной кривой.

Псевдокод классического алгоритма в рекурсивной реализации имеет следующий вид:

```
function
DouglasPeucker(PointList[], epsilon)
  //Находим точку с максимальным
  расстоянием от прямой между первой и
  последней точками набора
  dmax = 0
  index = 0
  for i = 2 to (length(PointList) - 1)
    d = PerpendicularDistance(PointList[i],
    Line(PointList[1], PointList[end]))
    if d > dmax
      index = i
      dmax = d
    end
  end
  //Если максимальная дистанция
  больше, чем epsilon, то рекурсивно вызы-
  ваем её на участках
  if dmax >= epsilon
    //Recursive call
    recResults1[] = DouglasPeucker(
    PointList[1...index], epsilon)
    recResults2[] = DouglasPeucker(
    PointList[index...end], epsilon)

    // Строим итоговый набор точек
    ResultList[] =
    {recResults1[1...end-1]
    recResults2[1...end]}
  else
    ResultList[] = {PointList[1],
    PointList[end]}
  end

  // Возвращаем результат
  return ResultList[]
end
```

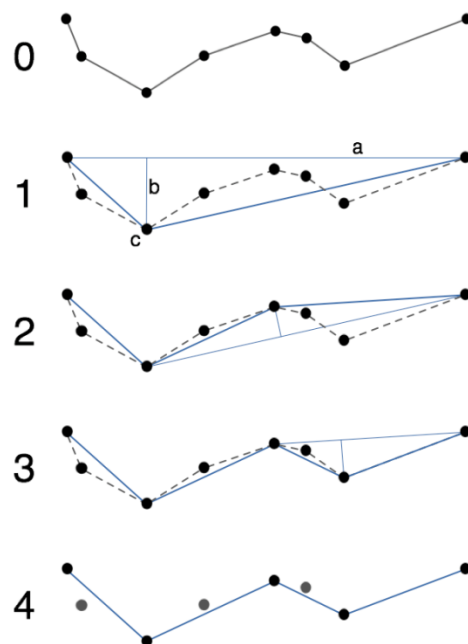


Рис.1. Шаги работы классического алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера

### Модифицированный алгоритм сглаживания точек маршрута

Необходимость модификации классического алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера связана с количественной оценкой минимальных и максимальных отклонений точек между граничными точками ломанной. Действительно, классический алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера имеет единственный настраиваемый параметр – точность аппроксимации. В расчет не берутся соотношения между точками с минимальным и максимальным отклонениями, количество таких точек, их индексы. Данные характеристики исходного множества точек существенным образом влияют на процесс сглаживания и конечный результат, особенно в контексте линейаризации участков маршрута движения робота при движении. Важно отметить, что кусочно-линейная кривая не должна существенно зависеть от одиночных точек, имеющих значительные

отклонения по исходной многозвенной ломанной. Разработка модифицированного алгоритма направлена на устранение данного ограничения.

Для обоснованной линейаризации участков маршрута классический алгоритм дополняется этапом предобработки, включающим сбор данных о количественных характеристиках в промежуточных точках списка. Для этого дополнительно определяется минимальное отклонение  $b_{\min}$  между граничными точками и подсчитывается количество точек, имеющих максимальное и минимальное отклонения –  $\text{count}_{\max}$ ,  $\text{count}_{\min}$ .

В алгоритме модификации подлежит второе правило рекурсивного деления ломанной на части. При выполнении условия  $b_{\max} > \varepsilon$  выполняется проверка соотношений:

$$b_{\max}/b_{\min} > \eta, \tag{1}$$

$$b_{\max}/b_{\min} > \varepsilon, \tag{2}$$

где  $\eta$  – настраиваемый предельный размах отклонений.

Если конъюнкция условий (1) и (2) ложная, то выполняются шаги классического алгоритма сглаживания. Если конъюнкция условий (1) и (2) истинная, то выполняется дополнительная проверка

количественных соотношений отклонений точек:

$$\text{count}_{\max}/n < \vartheta_1, \tag{3}$$

$$\text{count}_{\min}/n > \vartheta_2. \tag{4}$$

где  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  – настраиваемые пропорции точек с максимальным и минимальным отклонениями к общему размеру множества точек.

При выполнении условий (3) и (4) точки трактуются как шум в исходном наборе, который подлежит удалению. В результате будет сформирована сокращенная ломанная без «зашумленных» точек.

Как указано выше, основу вычисления определяет шаг поиска точки с максимальным отклонением.

Например, для списка из 10 точек A, B, C, D, E, F, I, G, H, J (рис. 2) вычисляются отклонения:

$$b_2 = b_5 = b_6 = b_9 = 2$$

$$b_3 = b_7 = 5$$

$$b_4 = 7$$

$$b_8 = 3.$$

В отличие от классического алгоритма анализируются не все отклонения  $b_i$  ( $i=2-8$ ), а лишь первые  $k$  отклонений ( $k=3$ ). В результате предварительно выбирается точка D:  $b_{\max}=7$ ,  $\text{index}_{\max}=4$ .

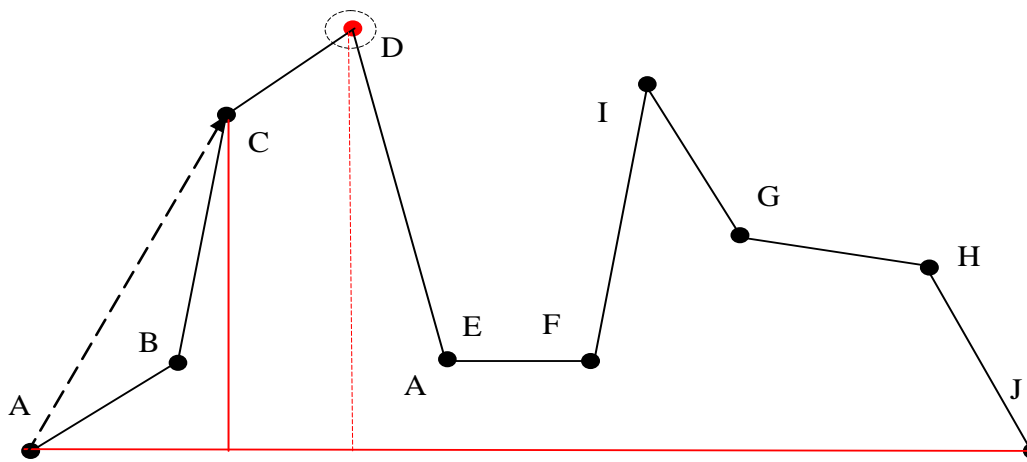


Рис. 2. Сглаживание с отсециением точки-шума D

Тем не менее, указанная фиксированная погрешность  $\epsilon=5$  показывает, что точка D с индексом  $\text{index}_{\max}=4$  не может считаться опорной при сглаживании, так как понимается как шум. В итоге за первую опорную точку выбирается точка C с  $\text{index}_{\max}=3$ . Процесс выбора опорной точки C и сглаживания отмечен красными линиями, а сглаженная ломаная указана штриховым вектором.

Рисунки 3 и 4 отражают последующие шаги работы модифицированного ал-

горитма сглаживания (синий и зеленый цвета соответственно). Также анализируются первые k точек и выбирают максимальное отклонение, но не превышающее значение погрешности.

Алгоритмическая особенность сглаживания с отсечением точки-шума I связана с тем, что в случае, если точка-шум является последней среди k анализируемых, то за опорную берется k+1 точка.

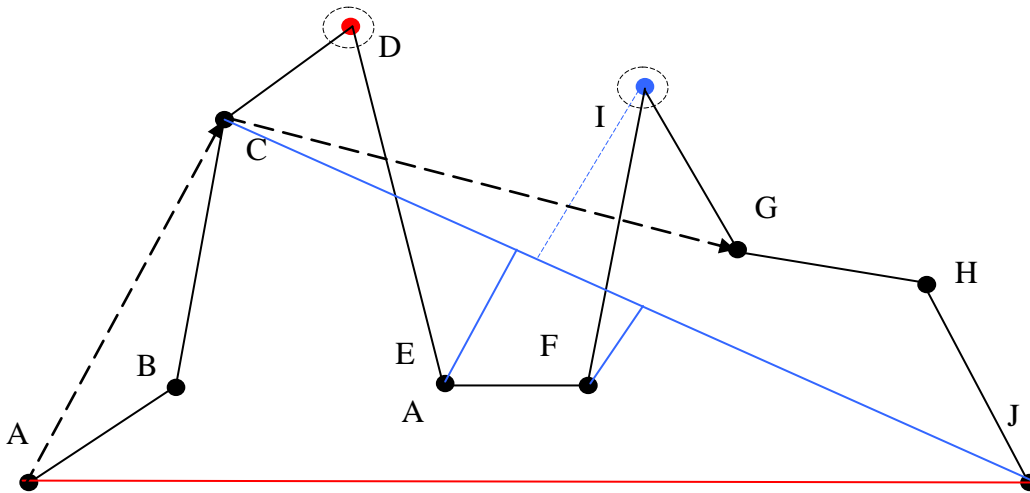


Рис. 3. Сглаживание с отсечением точки-шума I

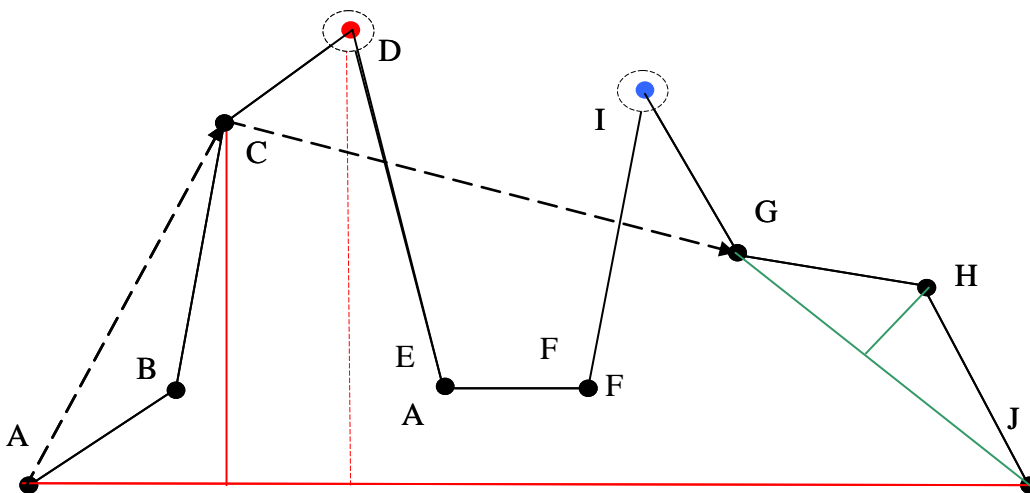


Рис. 4. Сглаживание последнего набора точек

В итоге формируется сглаженная ломанная кривая (штриховой вектор), имеющая меньший размах отклонения опорных точек между граничными точками (рис. 5).

Для сравнения на рис. 6 приведена сглаженная кривая как результат работы классического алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера.

Анализ рис.5 и рис.6 показывает, что количественно сглаженные ломанные имеют одинаковое число участков - 4. Для классического алгоритма – это путь ADFJ. Для модифицированного алгорит-

ма – это путь ACGJ. Тем не менее, средний размах отклонений по ADFJ и ACGJ составил 34% и 22% соответственно. В результате движение робота по сглаженной ломанной по модифицированному алгоритму будет отличаться лучшими ходовыми качествами, что необходимо при работе в опасной, техногенной среде без присутствия оператора [3, 4, 5]. Также данный алгоритм имеет применение для организации поиска в пространстве состояний, понимаемом как неориентированный граф [6].

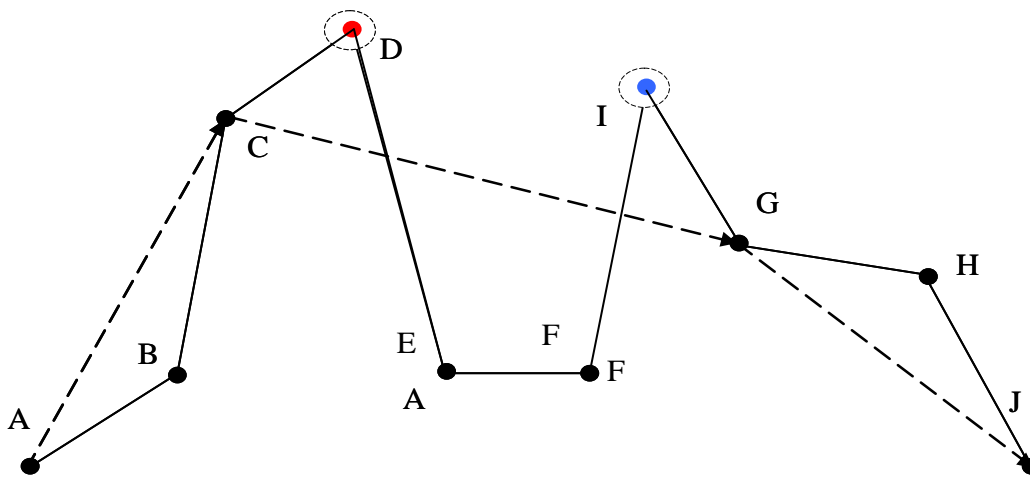


Рис. 5. Итоговая сглаженная ломанная по модифицированному алгоритму

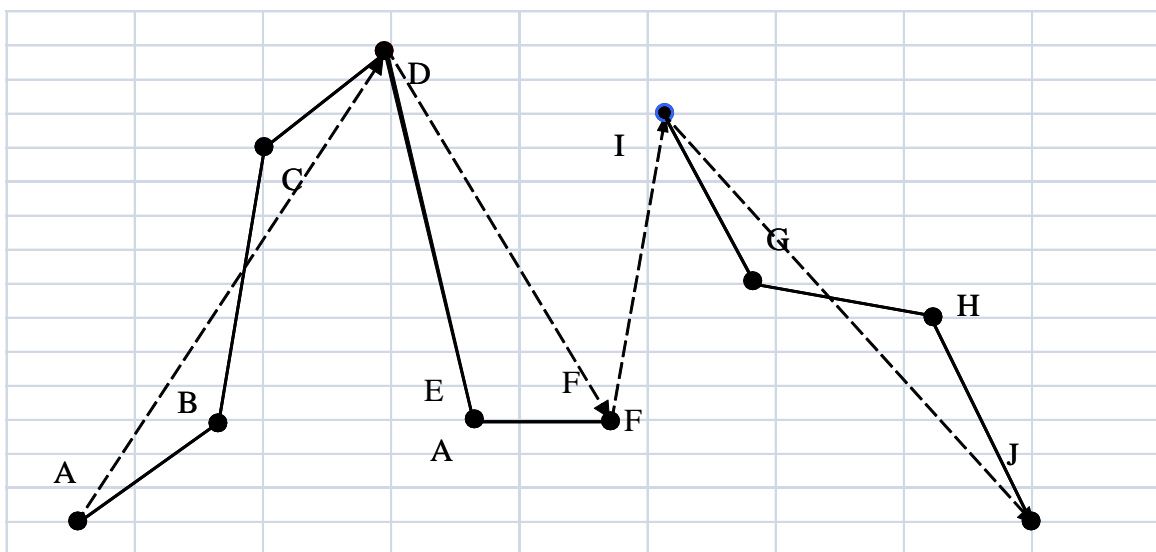


Рис.6. Сглаженная ломанная по классическому алгоритму Рамера-Дугласа-Пекера

## Вывод

В работе предложено повышение линейности ломанной оценивать через средний размах отклонений точек, вошедших в ломанную, относительно суммарных отклонений всех исходных точек. В классический алгоритм введен этап предобработки, включающий сбор данных о количественных характеристиках промежуточных точек исходной ломанной. Наряду с максимальным отклонением дополнительно определяется минимальное отклонение между граничными точками и подсчитывается количество точек, имеющих максимальное и минимальное отклонения. Эти количественные параметры используются для трех настраиваемых проверок – отношения максимального и минимального отклонений, отношений количества точек, имеющих минимальное и максимальное отклонение к общему числу точек ломанной. Учет этих отношений позволяет объективно выделять точки, понимаемые как шум, и исключать их из рассмотрения. После так называемой фильтрации точек применяются шаги классического алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера.

## Список литературы

1. Емельянов С.Г., Курочкин А.Г., Гривачев А.В. Модифицированная модель Туэ как базовая модель координации группы машин при разрешении конфликтов // Опτικο-электронные приборы и

устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2015. – С. 129-132.

2. Хаггарти Р. Дискретная математика для программистов. – М.: Техносфера, 2005. – 400 с.

3. Курочкин А.Г., Емельянов С.Г., Бородин М.В. Продукционная модель для координации бесконфликтного расположения группы автономных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2015. – Т.13, №6. – С. 10-14.

4. Гривачев А.В., Емельянов С.Г., Бородин М.В. Структурно-функциональная схема распознавания и оценки риска в системе управления роботизированными много-функциональными машинами // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2015. – Т.13, №6. – С. 4 - 9.

5. Лоторев П.В., Курочкин А.Г., Гривачев А.В. Математическая модель динамической коррекции маршрута подвижного робота // Научно-технические технологии. – 2016. – Т. 17. № 3. – С. 21-25.

6. Титенко Е.А., Тутов Е.Б. Модифицированный алгоритм поиска с итерационным заглублиением на графовых структурах // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – №3 (36). – С.82-90.

*Получено 29.08.16*

**A.G. Kurochkin**, Postgraduate Student, Southwest State University (Kursk)  
(e-mail: dk.kursk@gmail.ru)

**E.A. Titenko**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: johntit@mail.ru)

## MODIFIED ALGORITHM FOR PATH POINTS SMOOTHING

*The article deals with the issue of linearization of a broken curve consisting of path points. Restrictions of classical Ramer-Douglas-Peucker algorithm are shown in the paper. These restrictions are important for a robot for resources*



consumption and keeping the speed in the field. They include the use of such base curve points that have maximum values of coordinate deviation between the first and the last points. In this case robot's motion path is smoothed, but the rotary angles are still wide. The robot has to stop at base points and turn according to the path. This action increases the path time. Due to this it is impossible to use the algorithm directly to smooth the mobile robot motion.

The phase of pre-processing has been introduced into Ramer-Douglas-Peucker algorithm, which includes collection of data about numerical data of via points of the initial curve. Consideration of these data allows objective identification of points of the curve which are understood as noise. In contrast to the initial algorithm, base points with large coordinate values are not considered. To do this, deviations of all points between the first and the last ones are analyzed. Statistic data for the curve are acquired. Based on user-set limit deviations, points which will be understood as noise are defined. As the result, the obtained broken curve has a smaller span between points. The number of points in the curve decreases. These changes provide for better performance of a mobile robot.

**Key words:** broken curve, approximation, deviation, mobile robot.

\*\*\*

## Reference

1. Emel'janov S.G., Kurochkin A.G., Grivachev A.V. Modificirovannaja model' Tuje kak bazovaja model' koordinacii gruppy mashin pri razreshenii konfliktov // Optiko-jelektronnye pribory i ustrojstva v sistemah raspoznavanija obrazov, obrabotki izobrazhenij i simvol'noj informacii: sbornik materialov XII Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. – Kursk, 2015. – S. 129-132.
2. Haggarti R. Diskretnaja matematika dlja programmistov. – M.: Tehnosfera, 2005. – 400 s.
3. Kurochkin A.G., Emel'janov S.G., Borodin M.V. Produkcionnaja model' dlja koordinacii beskonfliktного raspolozhenija gruppy avtonomnyh robotov // Informaciono-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy. – 2015. – T.13, N6. – S. 10-14.
4. Grivachev A.V., Emel'janov S.G., Borodin M.V. Strukturno-funkcional'naja shema raspoznavanija i ocenki riska v sisteme upravlenija robotizirovannymi mnogo-funkcional'nyh mashinami // Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy. – 2015. – T.13, N6. – S. 4 - 9.
5. Lotorev P.V., Kurochkin A.G., Grivachev A.V. Matematicheskaja model' dinamicheskoj korrekcii marshruta podvizhnogo robota // Naukoemkie tehnologii. – 2016. – T. 17. № 3. – S. 21-25.
6. Titenko E.A., Tutov E.B. Modificirovannyj algoritm poiska s iteracionnym zaglublениem na grafovyh strukturah // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2011. – №3 (36). – S.82-90.

УДК 681.3

**Б.Н.Тишуков**, аспирант, ФГБОУ ВО «ВГТУ» (Воронеж) (e-mail: tishykov\_boris@mail.ru)

**Я.Е.Львович**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ВГТУ» (Воронеж) (тел.(473) 243-77-04)

## **АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД К АЛГОРИТМУ ОБЕЗЬЯНЬЕГО ПОИСКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ СО СТРУКТУРНОВАРИАТИВНОЙ ФОРМОЙ УПРАВЛЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

Представленная статья посвящена исследованию особенностей объектов со структурно-вариативной формой управления. Приводятся результаты анализа динамического режима управления объектами, на основе которых выявляются его особенности. Определяются цель и задачи оптимизации объектов данного типа в динамическом режиме управления, рассматриваются методики, позволяющие получить наилучшее из возможных решений задачи этого класса. Предлагается описательная постановка задачи структурной оптимизации с элементами вариативности в динамическом режиме. По описанию строится и исследуется оптимизационная модель объектов рассматриваемого типа, в