

УДК 681.5.23  
ББК 32.965

**РЕАЛИЗАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО  
АЛГОРИТМА РЕКУРРЕНТНО-ПОИСКОВОГО  
ОЦЕНИВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-  
ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ  
ПО РЕЛЬЕФУ МЕСТНОСТИ**

**Белов Р. В.<sup>1</sup>,**

*(ПАО «АНПП «Темп-Авиа», Арзамас)*

**Огородников К. О.<sup>2</sup>**

*(ПАО «АНПП «Темп-Авиа»,*

*Арзамасский политехнический институт*

*(филиал НГТУ), Арзамас)*

*Рассматривается рекуррентно-поисковый алгоритм корреляционно-экстремальной навигационной системы по рельефу местности, способный оценивать горизонтальные координаты, высоту и вертикальную скорость по измерениям инерциальной навигационной системы, радиовысотомера и эталонной информации. Однако при наличии сбоев, ложных данных и слабой информативности рельефа этот алгоритм не может обеспечить надежной и точной коррекции. В связи с вышесказанным предлагается ввести условия достоверности, что позволит ограничить влияние ошибок в определении горизонтальной скорости, проводить оценивание при наличии сбоев и минимизировать вероятность выдачи ложных поправок. Кроме того, в статье рассмотрены особенности реализации вышеуказанного алгоритма, направленные на общее повышение быстродействия.*

---

<sup>1</sup> Роман Валерьевич Белов, ведущий математик.

<sup>2</sup> Кирилл Олегович Огородников, инженер-математик, аспирант (okplay@mail.ru).

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная навигационная система, рекуррентно-поисковый алгоритм, оценивание параметров движения, снижение вычислительной сложности.

## **1. Введение**

Методы навигации по геофизическим полям получили свое распространение примерно в 60-х гг. XX века, когда выявились возможности использования некоторых видов аномальных физических полей, которые ранее в навигации служили только помехами. Ввиду «случайности» аномальных геофизических полей алгоритмы функционирования соответствующих навигационных систем имеют резко выраженную специфику – сопоставление наблюдаемого геофизического поля с его эталоном осуществляется в бортовой навигационной системе посредством функционала типа корреляционной функции, при этом осуществляется определение или поиск экстремума функционала. Системы навигации по геофизическим полям получили название корреляционно-экстремальных навигационных систем, или КЭНС [2, 3, 5].

Как известно, при автономном функционировании инерциальной навигационной системы (ИНС) накапливаются ошибки в определении координат и вектора скорости, в связи с чем возникает задача коррекции ИНС по доступным измерениям поля высот рельефа. При движении на малых высотах вблизи поверхности часто используются радиометрические измерители скорости, угла сноса и высоты над поверхностью. Ошибки в определении скорости ИНС могут быть оценены непосредственно по этим измерениям, что ограничит скорость нарастания ошибок по координатам, но не устранил их. Для оценивания ошибок в определении координат ИНС могут быть использованы корреляционно-экстремальные методы по измерениям поля высот рельефа местности.

Задача корреляционно-экстремальной навигации по рельефу местности сводится к оцениванию горизонтальных координат летательного аппарата (ЛА) по информации ИНС, измере-

ниям радиовысотомера и эталонной информации о рельефе в районе осуществления навигации.

## **2. Основные принципы корреляционно-экстремальной навигации**

В основу метода корреляционно-экстремальной навигации положен следующий принцип: географическое положение любой точки земной поверхности описывается единственным образом с помощью вертикальных профилей или топографией окружающей местности. Такая система требует предварительного картографирования или иного определения характеристик профилей поверхности того района, над которым система будет использоваться. Это может быть сделано, например, по стереоскопическим аэроснимкам местности с помощью известных в настоящее время способов. Предварительно определенные данные о рельефе района полетов запоминаются в цифровом виде в бортовом запоминающем устройстве.

Во время полета вертикальный профиль рельефа определяется вдоль истинной траектории полета с помощью радиовысотомера (для измерения геометрической высоты полета) и баровысотомера (для получения уровня отсчета профиля). Определив профиль рельефа вдоль траектории полета, система организует поиск в памяти вычислителя наиболее похожего, заранее запомненного профиля с известными координатами. Поиск осуществляется последовательным сопоставлением измеренного профиля с цифровым образом.

Алгоритмы, связанные со сплошным перебором всех возможных вариантов ошибок скорости и местоположения движущегося объекта и представляющие собой группу поисковых методов, надежно решают принципиальную для КЭНС проблему ликвидации больших начальных отклонений. Однако их использование в случае многопараметрического оценивания наталкивается на непреодолимые вычислительные трудности. Поэтому необходимо сокращать число параметров, по которым осуществляется сплошной перебор. Существенно нелинейной при синтезе алгоритмов КЭНС является зависимость геофизиче-

ского поля от позиционных координат. Эта нелинейная зависимость носит характер реализаций случайного процесса и не может быть разложена в ряд Тейлора, так как высшие производные реализаций геофизических полей могут не существовать. В отмеченном характере нелинейности и состоит специфика и трудность синтеза алгоритмов КЭНС.

В общей задаче многопараметрического оценивания навигационных параметров по рельефу местности целесообразно отделить часть, связанную с нелинейной зависимостью геофизических полей от позиционных координат, и сохранить в этой части сплошной перебор вариантов, чтобы алгоритмы надежно решали проблему ликвидации больших начальных отклонений. По отношению к остальным параметрам (высота, вертикальная скорость) – отказаться от сплошного перебора и использовать методы фильтрации.

Теоретической основой такого подхода как раз и является метод рекуррентно-поискового оценивания и его непрерывный аналог, объединяющие идеи калмановской фильтрации и теории проверки статистических гипотез.

### 3. Рекуррентно-поисковый алгоритм

Для решения задачи рекуррентно-поискового оценивания горизонтальных координат ЛА по инерциальной траектории, измерениям радиовысотомера и эталонной информации о рельефе в районе осуществления навигации используются упрощенные уравнения ошибок ИНС, включающие ошибки по горизонтальным координатам  $\delta x$  и  $\delta z$ , а также ошибки по ускорению, скорости в вертикальном канале и высоте ( $\delta a$ ,  $\delta v$  и  $\delta h$ ):

$$(1) \quad \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta z \\ \delta a \\ \delta v \\ \delta h \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^2}{2} & T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta z \\ \delta a \\ \delta v \\ \delta h \end{bmatrix}_{k-1} + \overline{w}_{k-1},$$

где  $T$  – период дискретизации,  $\overline{w_{k-1}}$  случайный процесс.

Уравнение измерения радиовысотомера без учета различных систематических погрешностей представляет собой разность истинной высоты  $h$  и функции высоты  $h_{nn}(x, z)$  подстилающей поверхности от горизонтальных координат, к которой прибавляется шум измерения  $v$ :

$$(2) \quad h_{pв} = h - h_{nn}(x, z) + v.$$

Для формирования алгоритма условно разделим вектор состояния на две части. В поисковую часть войдут оценки ошибок по горизонтальным координатам. Для них примем множество гипотез и будем оценивать корректность каждой из них. Оставшуюся часть вектора состояния будем оценивать с помощью фильтра Калмана (ФК) для каждой гипотезы. При этом по величинам невязок ФК можно судить об истинности гипотезы [4].

Множество гипотез строится по регулярной сетке, совпадающей с сеткой дискретизации функции эталонной высоты подстилающей поверхности  $h_{nn}$ . Количество гипотез определяется размером области неопределенности и размером дискрета эталона. Таким образом, можно установить однозначное соответствие между номером гипотезы  $ij$  и парой ошибок горизонтальных координат  $\delta x$  и  $\delta z$ .

Невязка  $e$ , представляющая собой высоту, полученную от ИНС, из которой вычитаются высота радиовысотомера и высота подстилающей поверхности, используется не только внутри ФК для вертикальных параметров, но и для оценки истинности гипотезы:

$$(3) \quad \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta v \\ \delta h \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ T & 1 & 0 \\ T^2/2 & T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta v \\ \delta h \end{bmatrix}_{k-1} + \overline{w_{k-1}},$$

$$(4) \quad e_{ij}(k) = h_{unc}(k) - h_{pв}(k) + \delta h(k) - H_{nn},$$

$$H_{nn} = h_{nn}(x_{unc}(k) + \delta x(i), z_{unc}(k) + \delta z(j)).$$

В результате работы фильтров по всем гипотезам будет получена функция суммы квадратов невязок от ошибок координат

$$(5) \quad F_{ij}(k) = \sum_{k=1}^N e_{ij}^2(k).$$

Для выбора истинной гипотезы проводится анализ массива суммы квадратов невязок  $F_{ij}(k)$  в пределах окна длиной  $N_{max}$  и его значения в точке минимума  $F_{min}(k)$ , а также осуществляется проверка критериев достоверности с последующим формированием сигнала достоверности коррекции. Необходимыми условиями достоверности найденного минимума являются:

$$1. \quad N_{valid} > N_{min},$$

где  $N_{valid}$  – количество достоверных измерений,  $N_{min}$  – минимальное количество измерений, необходимых для проверки условий достоверности;

$$2. \quad \sqrt{\frac{F_{min}(k)}{N_{valid}}} < L_{std},$$

где  $L_{std}$  – параметр зоны коррекции;

$$3. \quad D_{max} \leq m_1 + m_2 \frac{N_{valid}}{N_{max}},$$

где  $D_{max}$  – радиус области в пространстве ошибок координат  $\delta x$ ,  $\delta z$ , заданной условием

$$F_{ij}(k) < F_{min}(k) \left( 1 + \sqrt{\frac{m_3}{N_{valid}}} \right),$$

$N_{max}$  – максимальное количество измерений в окне;

$$4. \quad R_{min} \leq 1,$$

где  $R_{min}$  – размер области, в которой находился минимум в течении предыдущих  $N_{obl}$  измерений.

Параметры  $N_{min}$ ,  $N_{max}$ ,  $L_{std}$  вычисляются по эталонному массиву высот. Коэффициенты  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  выбираются по результатам испытаний так, чтобы корректирующие поправки выдавались только в случае достаточной обусловленности решения.

В случае выполнения всех условий, координаты минимума  $\delta x_{min}$  и  $\delta z_{min}$  преобразуются в оценки ошибок и поступают на выход алгоритма. Если существует необходимость, возможно проведение дополнительного уточняющего поиска в малой области для повышения точности.

При отсутствии признака достоверности радиовысотомера измеренная информация отбрасывается и не поступает в рекуррентно-поисковый алгоритм. После каждого пропуска первая полученная невязка не участвует в формировании массива квадратов невязок. Количество измерений в окне отслеживается и хранится в  $N_{valid}$ .

Обработка ложной информации происходит за счет оценивания найденного решения во время проверки условий достоверности. Те же условия достоверности предотвращают формирование ложных поправок при движении по недостаточно информативной траектории, а точность оценивания определяется погрешностями исходной информации и информативностью рельефа.

#### **4. Методы снижения вычислительной сложности рекуррентно-поискового алгоритма**

Несмотря на более низкую вычислительную сложность рекуррентно-поискового алгоритма по сравнению с поисковым методом за счет оценки вертикальных параметров методами рекуррентной фильтрации, существенным недостатком остается недостаточное быстродействие, связанное с перебором большого количества гипотез. Еще одним недостатком является требование к объему памяти вычислителя для хранения массивов квадратов невязок [1].

Один из способов оптимизации вычислений заключается в следующем. Если в процессе работы рекуррентно-поискового алгоритма момент получения измерений ИНС ( $x_{инс}$ ,  $z_{инс}$ ,  $h_{инс}$ ) и РВ ( $h_{рв}$ ) оказывается несинхронизированным с моментом достижения центра дискрета эталонного массива высот, то для увеличения точности коррекции требуется использование интерполяции между соседними дискретами, что увеличивает среднее время обработки одного измерения. В предлагаемом способе происходит преобразование частоты поступающих измерений к частоте смены дискрет эталона, т.е. от ИНС и РВ используются только те показания, которые попадают в область ближайшего дискрета. Таким образом, измерение профиля

рельефа рассчитывается как среднее значение за период прохождения дискрета, что позволяет делать выборки из массива высот без использования интерполяции, а получаемая переменная частота измерений будет зависеть от скорости движения ЛА и размера дискрета эталонной информации.

Следующий способ заключается в оптимизации процедуры обработки измерений ФК. В существующем алгоритме последовательная обработка данных для каждого измерения осуществляется путем обращения к каждому элементу массива векторов состояния, т.е. операции чтения-записи осуществляются до и после обработки текущего измерения каждым ФК. Предлагается уменьшить количество операций чтения-записи путем проведения обработки измерений группами, накопленными за некоторый малый промежуток времени. В этом случае операции чтения-записи будут осуществляться до и после обработки текущей группы измерений каждым ФК. Тогда при том же количестве обращений к массиву векторов состояния будет обработана вся группа измерений. Важно, что при этом структура ФК не меняется, поскольку каждое измерение из группы обрабатывается так же, как и в существующем алгоритме, т.е. рекуррентно. Количество измерений в группе  $N_b$  выбирается исходя из максимально допустимой задержки, а сама задержка определяется длительностью прохождения  $N_b$  дискрет и зависит от скорости движения и размера дискрета. На вычислителе с многоуровневой моделью памяти такой порядок вычислений оказывается эффективнее.

Еще один способ для уменьшения вычислительной сложности заключается в способе формирования суммы массивов квадратов невязок  $F_{ij}$ . Для реализации скользящего окна по массивам квадратов невязок  $e_{ij}^2$  в предлагаемом методе производится группировка массивов в сегменты по  $N_g$  элементов. Для каждого сегмента хранится только суммарный массив квадратов невязок, каждый элемент которого равен сумме  $N_g$  элементов массива сегмента. Следовательно, выходящие из окна массивы могут вычитаться из суммы содержимого скользящего окна только сегментами. Таким образом, требования к объему памяти для скользящего окна сокращаются в  $N_g$  раз. Величина  $N_g$  опре-



деляет минимально возможное количество массивов, вычитаемое из суммы содержимого скользящего окна. Общее количество массивов в сумме может изменяться на  $N_g$  за один такт, что ограничивает выбор данной величины.

Предложенный метод повышения производительности реализуется следующим образом (рис. 1).

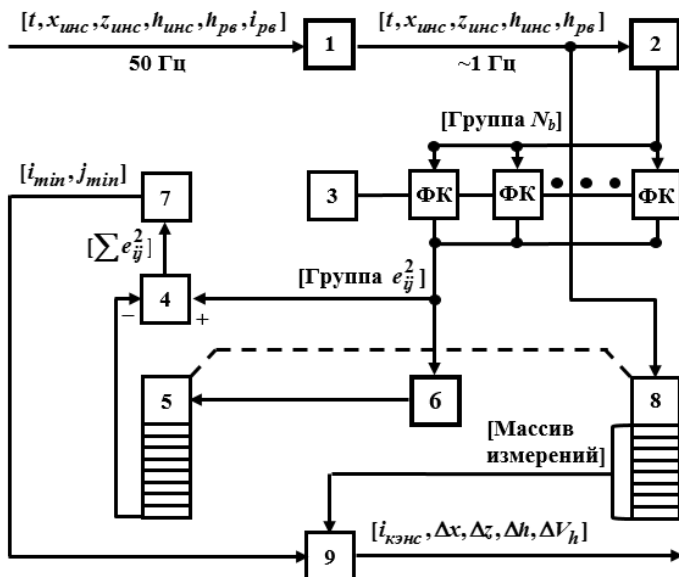


Рис. 1. Схема модифицированного алгоритма рекуррентно-поискового оценивания. Блоки: 1 – блок преобразования; 2 – формирование групп; 3 – блок эталонной информации; 4 – блок суммирования; 5 – очередь массивов квадратов невязок; 6 – формирование сегментов массивов квадратов невязок; 7 – поиск минимума; 8 – очередь измерений; 9 – формирование выходной информации

Преобразование входной информации и ее выдача происходит в случае, если изменилась целая часть координаты  $x_{инс}$ , т.е. произошел переход через границу дискрет. Состав выходной информации соответствует входному за исключением от-

сутствия признака достоверности РВ  $i_{рв}$ . Выходные данные не формируются для недостоверных измерений РВ, а также при нахождении ЛА вне зоны коррекции.

Затем производится формирование групп измерений длиной  $N_b$  и вся оставшаяся часть устройства функционирует на пониженной в  $N_b$  раз частоте.

Основная часть алгоритма состоит из множества ФК, на входы которых поступают эталонная информация и сформированные группы измерений. Каждому ФК соответствует гипотеза о величинах ошибок  $\delta x$  и  $\delta z$ , а вектор состояния содержит оценки вертикальных ошибок. На выходах ФК формируется не более  $N_b$  массивов квадратов невязок, причем количество массивов может быть меньше  $N_b$ , если по меткам времени  $t$  в входном блоке измерений обнаружен достаточно длительный пропуск информации.

Далее происходит накопление суммы массивов квадратов невязок, а затем формируется скользящее окно, организованное очередью массивов квадратов невязок совместно с очередью измерений. Поступающие в скользящее окно массивы группируются в сегменты по  $N_g$  элементов. В окне хранятся только суммы сегментов, а не отдельные массивы квадратов невязок. Если в течении  $N_g$  тактов были пропуски, то сегмент заполняется, насколько это возможно. На выходе скользящего окна крайний элемент проверяется по условию выхода, и в случае успеха сегмент вычитается из суммы массивов квадратов невязок. При этом соответствующее количество элементов вычитается также в очереди измерений.

Поиск минимума и проверка условий достоверности осуществляется путем использования текущей суммы массивов квадратов невязок.

При успешном прохождении условий достоверности, найденные координаты и сохраненные измерения из заполненной очереди используются для окончательного формирования выходной информации.

Таким образом, построенный алгоритм отличается от оригинального тем, что поступающие измерения преобразуются к переменной частоте, зависящей от скорости движения ЛА, а

затем обрабатываются группами. Поиск минимума и проверка условий достоверности производится реже в  $N_b$  раз. Длина скользящего окна не постоянна, так как выходящие из него массивы вычитаются сегментами по  $N_g$  элементов.

## 5. Результаты моделирования

При оценке работы КЭНС для моделирования подстилающей поверхности и подготовки эталонного массива высот использовались данные Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM). Для оценки функционирования условий достоверности задавался сбой, приводивший к некорректной работе базового рекуррентно-поискового алгоритма. Сбой представляет собой аддитивную ошибку по высоте РВ, задаваемую в течение нескольких секунд. Коррекция в базовом алгоритме проводилась при наборе минимально возможного количества измерений  $N_{min}$ . При использовании модифицированного алгоритма коррекция не проводилась до момента выполнения всех условий достоверности. Размер зоны коррекции составляет  $200 \times 101$  дискрет, размер дискрета –  $125 \times 125$  м. Начало измеряемого профиля находится в точке (70 дискрет; 70 дискрет).

На рис. 2 показаны линии уровня рельефа и траектории движения, полученные по результатам коррекции инерциальной траектории с помощью поправок, сформированных в базовом и модифицированном алгоритмах соответственно. Моделирование показало, что ошибки корректирующих поправок базового алгоритма составляют 24 дискрета по поперечной оси и 1 дискрет по продольной оси, в то время как у модифицированного алгоритма не превышают 1 дискрета.

Иными словами, добавление критериев достоверности позволило ограничить выдачу ошибочных корректирующих поправок рекуррентно-поисковым алгоритмом. Однако выполнение условий достоверности увеличивает время до наступления момента коррекции.

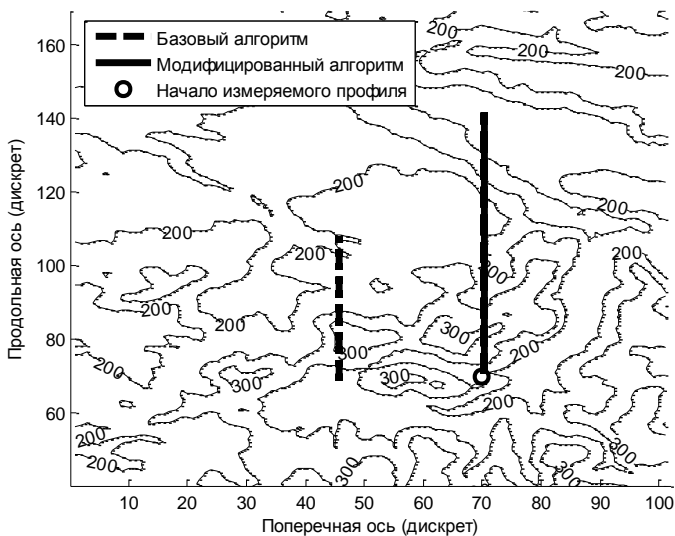


Рис. 2. Сравнение траекторий

Производительность алгоритмов оценивалась путем фиксации времени их выполнения. Характеристики вычислителя, на котором проводились испытания, следующие:

- архитектура микропроцессора: MIPS IV;
- тактовая частота ядра: 396 МГц.

На рис. 3 показана оценка быстродействия рекуррентно-поискового алгоритма в базовом исполнении, а также его модифицированного варианта, полученная по результатам проведения 1000 испытаний и представленная средним значением по всем испытаниям. Распределение ошибок горизонтальных оценок для базового и модифицированного алгоритмов при этом оказалось одинаковым.

По результатам проведения испытаний видно, что вышеуказанные методы повышения производительности позволяют снизить нагрузку на вычислитель более чем в 6 раз.

Таким образом, изменение структуры алгоритма и введение условий достоверности повлекло за собой повышение эффективности вычислений и снижение требований к характеристикам вычислителя, а также обеспечило функционирование КЭНС

в условиях сбоев, ложных данных и слабой информативности рельефа.

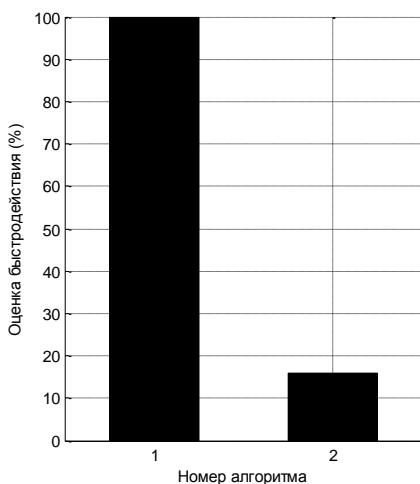


Рис. 3. Оценка быстродействия построенных алгоритмов:  
1 – базовый алгоритм; 2 – модифицированный алгоритм

## 6. Заключение

Модифицированный алгоритм рекуррентно-поискового оценивания КЭНС по рельефу местности позволяет проводить коррекцию горизонтальных координат при наличии сбоев, ложных данных и слабой информативности рельефа, что было достигнуто путем введения условий достоверности. Снижение вычислительной сложности алгоритма обеспечивается за счет применения нескольких способов оптимизации вычислений, что приводит к значительному уменьшению количества выполняемых математических операций по сравнению с базовым рекуррентно-поисковым методом.

Таким образом, разработанный модифицированный алгоритм КЭНС предназначен для внедрения в перспективные разработки, основной задачей которых является определение и коррекция координат ЛА. Вследствие уменьшения времени

выполнения рекуррентно-поискового алгоритма, освободились дополнительные вычислительные ресурсы, которые могут быть использованы, например, для решения других смежных задач, а также для применения более сложных и требовательных к вычислителю методов комплексирования.

### **Литература**

1. БЕЛОВ Р.В., ОГОРОДНИКОВ К.О. *Повышение производительности алгоритма корреляционно-экстремальной навигационной системы* // Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 363–369.
2. БЕЛОГЛАЗОВ И.Н., ДЖАНДЖГАВА Г.И., ЧИГИН Г.П. *Основы навигации по геофизическим полям*. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 328 с.
3. ДЖАНДЖГАВА Г.И., ГЕРАСИМОВ Г.И., АВГУСТОВ Л.И. *Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям* // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №3(140). – С. 74–83.
4. КОСТЕНКО Г.И., МИШИН А.Ю., БЕЛОВ Р.В. *Способ коррекции координат, высоты и вертикальной скорости летательного аппарата и устройство для его осуществления* // Пат. 2547158 Российская Федерация, МПК G01C21/20. – №2013151947/28, заявл. 21.11.2013, опубл. 10.04.2015, Бюл. №10. – 8 с.
5. КРАСОВСКИЙ А.А., БЕЛОГЛАЗОВ И.Н., ЧИГИН Г.П. *Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем*. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 448 с.

## IMPLEMENTATION OF MODIFIED RECURRENT-SEARCH ESTIMATION ALGORITHM OF CORRELATION-EXTREMAL TERRAIN-AIDED NAVIGATION SYSTEM

**Roman Belov**, PAO «ANPP «Temp-Avia», Arzamas, leading mathematician.

**Kirill Ogorodnikov**, PAO «ANPP «Temp-Avia», Arzamas Polytechnical institute, Arzamas, engineer-mathematician, post-graduate student (okplay@mail.ru).

*Abstract: The article discusses the recurrent-search algorithm of correlation-extremal terrain-aided navigation system that is able to estimate horizontal coordinates, altitude and vertical velocity from measurements of the inertial navigation system, radio altimeter and reference information. However, in the presence of failures in measurements and ill-conditioned reference information, this algorithm cannot provide reliable and accurate correction. In relation to the above, it is proposed to introduce the reliability condition that prevents wrong solution to be given in case of ill-conditioned reference information or presence of large errors in measurements. This allows us to find the solution in the presence of failures, and also to limit the influence of errors in the determination of horizontal velocity. Overall effect of reliability conditions is to solve a large number of ill-conditioned cases, but minimize the probability of wrong correction. In addition, the article examines features of the above-stated algorithm, aimed at improving an overall performance.*

**Keywords:** correlation-extremal navigation system, recurrent-search algorithm, estimation of motion parameters, reduction of computational complexity.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.М. Вишневым.*

*Поступила в редакцию 08.04.2017.*

*Опубликована 31.07.2017.*