

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ПОИСКОВОЙ РЕЛЬЕФОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Е. А. Поленок, С. Ю. Страхов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова

Поступила в редакцию 20.01.2015 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается подход к реализации алгоритма поисковой корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС). Получены критерии, позволяющие повысить точность определения местоположения летательного аппарата (ЛА) с использованием алгоритма поисковой КЭНС.

**Ключевые слова:** бортовая матрица высот рельефа, критерий информативности поля рельефа, радиовысотомер, КЭНС, ЛА.

**Annotation.** The article discusses the algorithm implementation method terrain aided navigation (TAN). The obtained criteria, allowing to improve the accuracy aircraft positioning with TAN algorithm.

**Keywords:** stored elevation map, terrain profile applicability criterion, altimeter, TAN, aircraft.

## ВВЕДЕНИЕ

Основу навигационного счисления на борту современных летательных аппаратов (ЛА) составляет инерциальная навигационная система (ИНС). Весомым преимуществом ИНС, по сравнению с большинством позиционных корректоров, является её автономность, но со временем накапливаются ошибки счисления. Для коррекции ошибок счисления, как правило, используют комбинированные системы ИНС и позиционных корректоров, например, спутниковой навигационной системы (СНС). Преимуществом СНС является высокая точность позиционной коррекции, но при этом необходимы внешние сигналы от группировки орбитальных спутников [6]. Поэтому перспективным направлением является развитие автономных систем позиционирования местоположения ЛА – корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС) по геофизическим полям.

В качестве геофизических полей могут выступать, например, магнитное, гравитацион-

ное, тепловое поле земли или рельеф земной поверхности [1]. Рельефометрические КЭНС определяют местоположение ЛА на основе сравнения измерений возвышений рельефа земной поверхности над уровнем моря с эталонной информацией базы данных высот рельефа земли. Высота рельефа земли определяется разностью измерений радиовысотомера и абсолютной высоты над уровнем моря как показано на рис. 1.

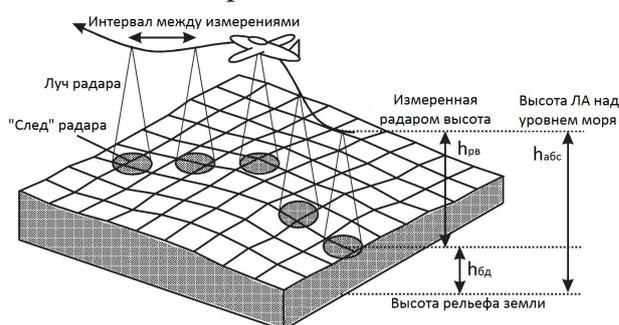


Рис. 1. Измерение высот рельефа по радиовысотомеру [2]

Рельефометрические КЭНС можно разделить на две группы: поисковые и беспоисковые. Поисковый метод основан на переборе ряда гипотез о местоположении ЛА и формировании решающей функции, экстремум

которой указывает на гипотезу, соответствующую истинному местоположению ЛА. Тем не менее, максимум функции не всегда будет говорить о достоверном решении, например, в случае если истинное местоположение ЛА находится за пределами зоны поиска. От точности измерения поля рельефа земли радиовысотомером и от характера рельефа земной поверхности (от равнинной до сильнопересеченной местности) зависит достоверность выбранной алгоритмом поисковой КЭНС гипотезы и, в конечном счете, точность определения местоположения ЛА. Поэтому необходимо определить критерии, позволяющие исключить выбор поисковым алгоритмом «ложной» гипотезы и повысить точность определения местоположения ЛА с использованием алгоритма поисковой КЭНС.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ПОИСКОВОЙ КЭНС

Датчиком информации для оценки поля рельефа является радиовысотомер. Датчик барометрической высоты исключен в силу значительной ошибки (до 200м.), обусловленной изменением давления на разных высотах и разных районах местности. В связи с этим в качестве измерений поля рельефа используется разница показаний радиовысотомера с интервалом равным 1сек.:

$$\Delta H_{izm} = Hrv_k - Hrv_{k-1} - \Delta H_{zeta},$$

где  $\Delta H_{zeta} = Wzeta \cdot \Delta t$  – изменение высоты на текущем интервале, измеренное радиовысотомером, и не связанное с изменением рельефа местности.

Суть поискового алгоритма сводится к следующему. Назначается доверительный квадрат шириной  $2 \cdot \Delta \max$  с центром в точке текущих считаемых координат самолета. Значение  $\Delta \max$  задается исходя из максимально возможных ошибок счисления навигационной системы (НС) в режиме автономной работы. Ошибки счисления современных инерциальных навигационных систем за час полета составляют:  $2\sigma = 1.75 \dots 3.7$  км [2, 3]. Тогда можно считать, что реальное положение ЛА совпадает с одной из дискретных то-

чек доверительного квадрата. Из бортовой матрицы высот рельефа (МВ) выделяется двумерный массив  $Hkarta[N, N]$ . Шаг дискретизации выбирается оптимальный с точки зрения сохранения точности высоты рельефа из МВ, а также уменьшения размера загружаемой матрицы высот в бортовую вычислительную машину ЛА.

Проверяются гипотезы о возможных значениях ошибок местоположения подвижного объекта. Множество гипотез образуют доверительный квадрат, математической формой описания которого является двумерная матрица чисел  $Apoisk[N, N]$ , аргументами которой являются индексы  $i$  и  $j$  – номера гипотез об ошибках НС. В качестве критерия степени несовпадения реализаций выбран метод наименьших квадратов, который на  $k$ -м цикле функционирования примет следующий вид:

$$\min \sum_{i=1}^k \left| \Delta H_{karta_{i,j}} - \Delta H_{izm} \right|^2,$$

и, следовательно, элементами матрицы  $Apoisk[N, N]$  являются квадраты разности невязок  $\left| \Delta H_{karta_{i,j}} - \Delta H_{izm} \right|^2$ , где  $\Delta H_{karta_{i,j}}$  – элементы матрицы  $\Delta H_{karta}[N, N]$ .

$$\Delta H_{karta_{i,j}} = Hkarta_{k,i,j} - Hkarta_{k-1,i,j},$$

где  $Hkarta_{k,i,j}$  и  $Hkarta_{k-1,i,j}$  – высота рельефа из МВ в текущем и предыдущем цикле в интервале 1 сек. Поисковая матрица  $Apoisk[N, N]$  в каждом цикле функционирования КЭНС рассчитывается как:

$$Apoisk_{i,j} = Apoisk_{k-1,i,j} + \left| \Delta H_{karta_{k,i,j}} - \Delta H_{izm} \right|^2.$$

Таким образом, гипотеза, имеющая минимальное числовое значение  $Apoisk_{i_{\min}, j_{\min}}$  – есть наиболее достоверная гипотеза предполагаемой ошибки навигационной системы.

По критерию достоверности выбранной гипотезы невязка измеренной величины и реализации поля для гипотезы  $Apoisk_{i_{\min}, j_{\min}}$  в каждом цикле не должна превышать заданную величину:

$$dH < dHzad,$$

где  $dH = \Delta H_{karta_{i_{\min}, j_{\min}}} - \Delta H_{izm}$ .

В противном случае поисковая матрица обнуляется. Так как сам по себе поисковый алгоритм всегда будет находить минималь-

ное значение, то это условие позволяет отсеять «ложные» гипотезы, например, когда действительное положение ЛА находится за пределами исследуемого поля рельефа в случае больших ошибок навигационной системы. Значение  $dHzad$  определяется исходя из:

$$\begin{cases} dHzad = 20 \text{ м, } \sigma_{\text{поля}}^{\sim} < 70 \\ dHzad = 40 \text{ м, } 70 \leq \sigma_{\text{поля}}^{\sim} < 120 \\ dHzad = 70 \text{ м, } 120 \leq \sigma_{\text{поля}}^{\sim} < 200 \\ dHzad = 100 \text{ м, } \sigma_{\text{поля}}^{\sim} \geq 200 \end{cases}$$

Рассчитываются ошибки навигационной системы:

$$\delta Y = \left( i \min - \frac{N}{2} \right) \cdot \Delta y, \quad \delta X = \left( j \min - \frac{N}{2} \right) \cdot \Delta x.$$

При этом коррекция координат происходит следующим образом:

$$\begin{cases} X_{\text{кэнс}}_{gk} = X_{gk} + \delta X \\ Y_{\text{кэнс}}_{gk} = Y_{gk} + \delta Y \end{cases}$$

Представление матрицы высот выбрано в прямоугольных координатах Гаусса-Крюгера. Таким образом отпадает необходимость ориентации матрицы высот по курсу полета. На

рис. 2 показан принцип функционирования поискового алгоритма КЭНС.

В процессе полета на участке, содержащем матрицу высот, в определенные интервалы времени (в данном случае 1 сек.) из базы данных высот выбирается участок размера  $N \times N$  в точке текущего расчетного местоположения по данным НС. Независимо от курса полета ЛА ( $\Psi_1, \Psi_2$ ) участок всегда ориентирован на север, т.е. ось  $X$  (соответствует координате Хг-кр) направлена на север, а ось  $Y$  (соответствует координате Yг-кр) направлена на восток. При этом невязки  $\Delta X, \Delta Y$  между расчетным ( $X_{нс}, Y_{нс}$ ) и действительным ( $X_{д}, Y_{д}$ ) местоположением ЛА не зависят от изменения курса ЛА. Такое представление матрицы высот позволяет функционировать поисковому алгоритму КЭНС не только в горизонтальном полете, но и при выполнении маневров на маршруте.

Выбираемый по текущим координатам участок матрицы размера  $N \times N$  из базы данных высот рельефа проверяется на пригодность поля рельефа для осуществления корреляционно-экстремальной навигации. Задается

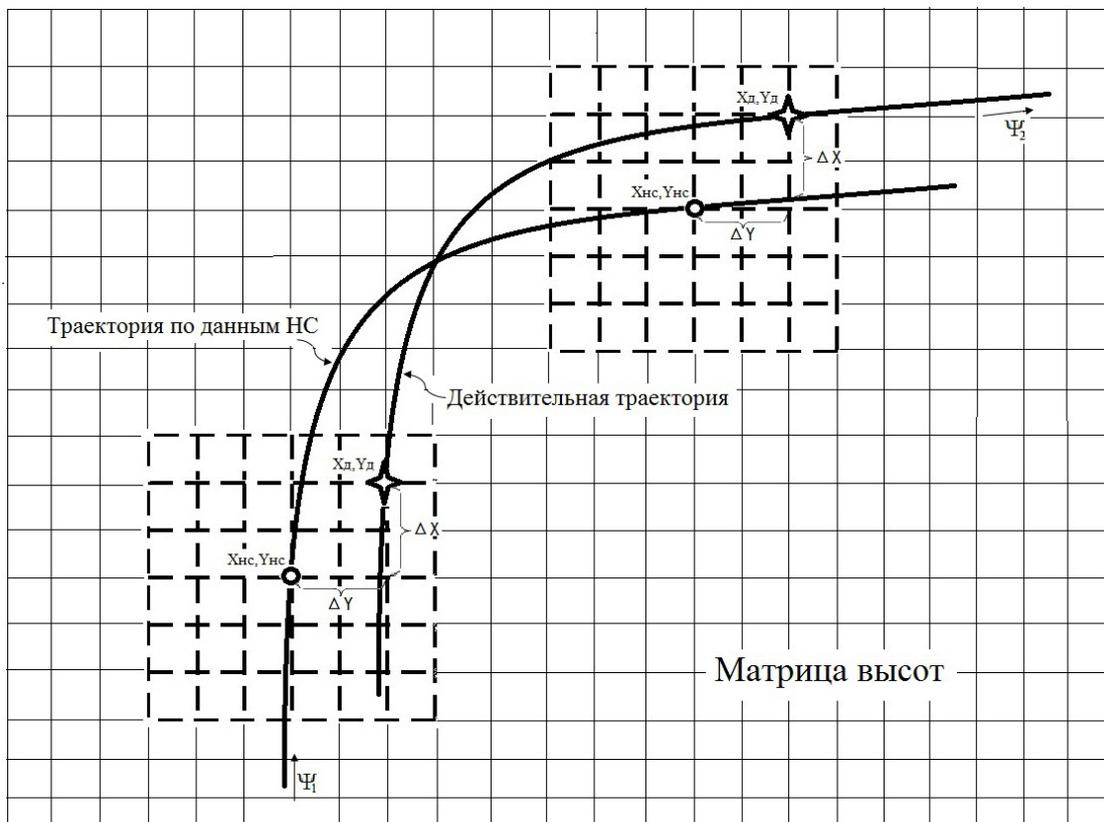


Рис. 2. Принцип функционирования поискового алгоритма КЭНС

обобщенная среднеквадратическая ошибка картографирования:

$$\sigma_{\sim\text{обобщ.}} = \sqrt{\sigma_{\sim\kappa}^2 + \sigma_{\sim\pi}^2},$$

где  $\sigma_{\sim\kappa}$  – среднеквадратическое значение ошибки отображения поля рельефа на исходных топографических картах,  $\sigma_{\sim\pi}$  – среднеквадратическое значение ошибки, возникающей при введении шага дискретизации  $\Delta x$  и  $\Delta y$  по координатам Гаусса-Крюгера в процессе построения бортовой цифровой рабочей карты системы (прямоугольной равномерной матрицы чисел).

Среднеквадратическое значение ошибки отображения поля рельефа  $\sigma_{\sim\kappa}$  на исходных топографических картах зависит от выбранной высоты сечения. Рельеф на картах изображается горизонталями. Высота сечения есть средний перепад высот рельефа между соседними горизонталями. Оптимальная высота сечения рельефа устанавливается с учетом масштаба карты и преобладающей крутизны склонов форм рельефа. В табл. 1 приведены высоты сечения, принятые на топографических картах [4].

Таблица 1  
Зависимость высоты сечения от масштаба карты [4]

Масштаб карты	Высота сечения, м		
	Для равнинной и холмистой местности	Для горной местности	Для высокогорной местности
1:25000	5	5	10
1:50000	10	10	20
1:100000	20	20	40
1:200000	20	40	80
1:500000	50	100	100

Из табл. 1 видно, чем крупнее масштаб карт, тем меньше высота сечения рельефа, т. е. на крупномасштабных картах рельеф изображается более подробно. Точность и подробность изображения рельефа на картах горизонталями зависит от ее масштаба и принятой высоты сечения. Среднеквадратические ошибки положения горизонталей по

высоте не превышают в равнинной и холмистой местности  $\sigma_{\sim\kappa} = 0,5h$  ( $h$  – высота сечения рельефа на данной карте), а на картах горных районов  $\sigma_{\sim\kappa} = 1,25h$ .

Значение ошибки  $\sigma_{\sim\pi}$  примем равной половине шага дискретизации  $\Delta x$  при построении бортовой цифровой карты рельефа местности:

$$\sigma_{\sim\pi} = 0.5\Delta x.$$

Ошибки радиовысотомера задаются по формуле:

$$\sigma_{\delta H_p} = \text{const} \cdot Hrv,$$

где  $\text{const} = 0.001 \dots 0.0075$  [5].

Обобщенная среднеквадратическая ошибка измерения поля:

$$\sigma_{\sim} = \sqrt{\sigma_{\sim\kappa}^2 + \sigma_{\sim\pi}^2 + \sigma_{\delta H_p}^2}.$$

По критерию информативности поля рельефа поле считается пригодным для навигации по соотношению сигнал/шум при условии:

$$\frac{\sigma_{\text{поля}}}{\sigma_{\sim}} > 1,$$

где  $\sigma_{\text{поля}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0, j=0}^{N, N} (m_x - Hkarta_{i,j})^2}{N \cdot N}}$ ,

$$m_x = \frac{\sum_{i=0, j=0}^{N, N} Hkarta_{i,j}}{N \cdot N},$$

$Hkarta_{i,j}$  – значение высоты рельефа из матрицы высот в точке  $i, j$ .

При условии пригодности поля рассчитывается линия пройденного пути:

$$Lp = Lp + Wx \cdot \Delta t,$$

где  $\Delta t$  – интервал работы КЭНС ( $\Delta t = 1$  сек.),

$$W = \sqrt{W_\eta^2 + W_\xi^2} \text{ – путевая скорость ЛА.}$$

Заданное значение линии пути  $Lp_z$  для принятия решения о коррекции местоположения ЛА поисковым алгоритмом КЭНС выбирается исходя из следующих условий:

– накопление достаточного числа реализаций измерения поля рельефа. Для более информативного поля (для сильнопересеченной и горной местности) количество реализаций требуется меньше, чем для малоинформативного поля.

– увеличение требуемого для коррекции числа реализаций измерения поля и соответственно увеличение значения  $Lp\_z$  приводит к увеличению влияния скоростной ошибки на ошибки инерциального счисления в промежутках между коррекциями поискового КЭНС. Так как ошибка счисления для первой и последней реализации измерения поля отличается, то разница между ними (ошибками счисления) добавляет ошибку в определении местоположения поисковым алгоритмом КЭНС. Ошибки ИНС по скорости составляют в среднем  $\delta V = 1$  м/с. При  $\Delta t = 1$  сек и количестве измерений поля, необходимых для принятия решения о коррекции  $k = 40 \dots 80$ , минимальный интервал времени между соседними коррекциями составит  $T = 40 \dots 80$  сек. Ошибка инерциального счисления при этом составит  $\sigma_{инс} = \delta V \cdot \Delta t \cdot k = 40 \dots 80$  м. При средней путевой скорости ЛА  $W = 250$  м/с временным интервалам  $T = 40 \dots 80$  сек. будет соответствовать пройденный путь  $Lp = 10000 \dots 20000$  м.

В зависимости от значения информативности поля  $\sigma_{поля}$  и средних ошибок инерциального счисления  $\sigma_{инс} < 80$  м, выбирается заданное значение линии пути:

$$\begin{cases} Lp\_z = 20000 \text{ м, } \sigma_{поля} < 40 \\ Lp\_z = 15000 \text{ м, } 40 \leq \sigma_{поля} < 70. \\ Lp\_z = 10000 \text{ м, } \sigma_{поля} \geq 70 \end{cases}$$

По критерию минимального пройденного пути решение о коррекции принимается при условии:

$$Lp > Lp\_z.$$

Исследование особенностей реализации поисковых алгоритмов КЭНС показало, что для принятия решения о коррекции местоположения ЛА с помощью поисковых КЭНС требуется накопление реализаций измерения поля. Минимальное время накопления информации составляет  $T = 40 \dots 80$  сек. При этом после коррекции местоположения КЭНС накапливаются ошибки инерциального счисления. К моменту следующей коррекции КЭНС ошибки инерциального счисления могут составлять более  $40 \dots 80$  м. Беспойсковые алгоритмы КЭНС, основанные на применении методов нелинейной калмановской фильтрации, требуют накопления информа-

ции измерения поля только для начальной настройки фильтра. После этого беспойсковый алгоритм КЭНС выполняет «слежение» по градиенту рельефа, оценивая ошибки определения местоположения навигационной системы на каждой итерации фильтра Калмана. Поэтому целесообразно применять комбинированные методы позиционной коррекции. При больших рассогласованиях навигационной системы осуществляется режим поиска, а при малых ошибках навигационной системы – режим «сопровождения» с помощью беспойскового алгоритма с применением расширенного фильтра Калмана.

## ВЫВОДЫ

Полученные критерии достоверности выбранной гипотезы, минимального пройденного пути и информативности поля рельефа земли позволяют исключить выбор поисковым алгоритмом «ложных» гипотез и повысить точность определения местоположения ЛА с использованием алгоритма поисковой КЭНС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоглазов И. Н., Джандгава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям. – М. : Наука, 1985.
2. Paul D. Groves. Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems. – Artech House, 2008.
3. Бабич О. А. Обработка информации в навигационных комплексах. – М. : Машиностроение, 1991.
4. Бубнов И. А., Кремн А. И., Калинин А. К., Шленников С. А. Военная топография. – М. : Военное издательство министерства обороны СССР, 1969.
5. Сосновский А. А., Хаймович И. А., Лутин Э. А., Максимов И. Б. Авиационная радионавигация. – М. : Транспорт, 1990.
6. Особенности использования фазовых измерений систем типа ГЛОНАСС для повышения точности в навигационных задачах / М. А. Артемов, Д. Е. Кочкин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2010. – № 2. – С. 19–26.

**Поленок Евгений Анатольевич** – ведущий инженер ОАО «НТЦ «Завод Ленинец»» (Санкт-Петербург), аспирант кафедры «Радиоэлектронные системы управления» Балтийского Государственного Технического Университета (БГТУ) «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.  
Тел.: 8-911-919-51-32, 8-(812)-307-83-96,  
E-mail: e.a.polenok@Onegroup.ru

**Страхов Сергей Юрьевич** – зав. кафедрой «Радиоэлектронные системы управления» Балтийского Государственного Технического университета (БГТУ) «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.  
Тел.: 8-911-216-76-86, 8-(812)-316-49-09,  
E-mail: strakhov\_s@mail.ru

**Polenok Evgenii** – leading engineer NTC “Zavod Leninetz”, postgraduate student of the Department “Electronic control systems” BGTU VOENMEH.

Tel.: 8-911-919-51-32, 8-(812)-307-83-96,  
E-mail: e.a.polenok@Onegroup.ru

**Strakhov Sergey** – Department Chairman, department “Electronic control systems”, BGTU VOENMEH.

Tel.: 8-911-216-76-86, 8-(812)-316-49-09,  
E-mail: strakhov\_s@mail.ru