

Кульченко Артем Евгеньевич – e-mail: liandal@rambler.ru; кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

Pshikhopov Vyacheslav Khasanovich – Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Medvedev Mikhail Yur'evich – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Kulchenko Artem Evgen'tvich – e-mail: liandal@rambler.ru; the department of electrical engineering and mechatronics; assistant.

УДК 527.8

С.А. Тарасов

**АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ
РАДИОМАЯКОВ ДЛЯ ОДНОКРАТНОЙ КОРРЕКЦИИ КООРДИНАТ
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЕ БЛИЖНЕЙ
РАДИОНАВИГАЦИИ**

Рассматривается задача поиска оптимальных по геометрическому фактору конфигураций радиомаяков, используемых для определения местоположения летательных аппаратов средствами наземной ближней радионавигации. При решении задачи учитывается рельеф местности и наличие участков, в которых запрещена установка радиомаяков. Приводится ряд положений, полученных в ходе экспериментальных исследований зависимости геометрического фактора от конфигурации искусственного навигационного поля. Предлагается разработанный авторами алгоритм последовательной оптимизации опорных конфигураций радиомаяков, трудоёмкость которого полиномиально зависит от числа радиомаяков и числа свободных клеток в области решения. Алгоритм основан на генерации опорных конфигураций из двух маяков методом перебора и добавлении в них новых радиомаяков с помощью комбинации эвристических и оптимизационных методов. Приводятся результаты экспериментальных исследований алгоритма, подтверждающие высокое качество получаемых решений и устойчивость алгоритма к неблагоприятным исходным данным.

Радионавигация; геометрический фактор; навигационное поле; радиомаяки.

S.A. Tarasov

**SEARCH ALGORITHM OF THE OPTIMAL RADIO BEACONS
CONFIGURATION FOR A SINGLE AIRCRAFT COORDINATES
CORRECTION IN AUTONOMOUS LOCAL RADIO NAVIGATION SYSTEM**

Problem is considered in article about searching optimal by geometrical factor radio beacons configurations, using for aircraft positioning by ground navigation systems. In solving the problem the lay of ground is taken into and areas where setting beacon is prohibited. A number of provisions derived from experimental studies of the geometrical factor depending on the configuration of the field of artificial navigation is contained. The authors propose an algorithm of serial optimization of the basic radio beacon configurations. Complexity of the algorithm depends polynomially on the number of beacons and the number of free cells in solution area. The algorithm is based on the brute force generation of support configurations of the two radio beacons and adding them to the new beacons using a combination of heuristic and optimization methods. Results of experimental studies of the algorithm, confirming the high quality of the obtained solutions and the stability of the algorithm to the adverse initial data are represented.

Radio navigation; geometrical factor; navigation field; radio beacons.

Введение. Формирование наземного искусственного навигационного поля (ИНП) для функционирования автономной системы ближней радионавигации (АСБРН) производится заблаговременно. В случае применения АСБРН для посадки летательных аппаратов (ЛА) на необорудованные и малооборудованные аэродромы развертывание ИНП выполняется относительно имеющейся взлетно-посадочной полосы с учетом требуемой траектории движения ЛА при заходе на посадку. Исходными данными для вычисления местоположения ЛА являются координаты наземных радиомаяков (РМ), образующих искусственное навигационное поле для АСБРН [1].

При расчете геометрической конфигурации развертываемого вблизи требуемой точки приземления ЛА искусственного навигационного поля принципиальное значение имеют следующие факторы:

- ◆ характеристики технического оборудования, используемого для позиционирования устанавливаемых РМ относительно точки требуемого приземления ЛА;
- ◆ рельеф местности, описываемой картой высот (цифровой моделью рельефа, ЦМР) с пространственными координатами точек местности в пределах области решения;
- ◆ возможность установки РМ на том или ином участке области решения с учетом доступности данного участка, характеристик рельефа местности, ландшафта и т.п.;
- ◆ положение точки коррекции и режим взаимодействия бортового модуля АСБРН, устанавливаемого на ЛА, с ИНП. В случае однократной коррекции координат на траектории движения ЛА задается точка или (с учетом принципа функционирования бортового радиодальномера АСБРН) короткий участок коррекции. В этом случае расчет конфигурации ИНП выполняется для единственного фиксированного положения ЛА [2].
- ◆ карта радиовидимости маяков из точки (точек) коррекции, связанная с рельефом местности, характером подстилающей поверхности, особенностями выбранного диапазона длин радиоволн [3].

Математической функцией, связывающей результирующую ошибку $\sigma_{\text{АСБРН}}$ определения местоположения ЛА по дальномерным измерениям средствами АСБРН, и ошибки $\sigma_{\text{исх}}$ исходных данных, является функция *GDOP* (Geometric Dilution of Precision), учитывающая так называемый "геометрический фактор" конфигурации ИНП и положения ЛА (в момент измерения расстояний до радиомаяков ИНП):

$$\sigma_{\text{АСБРН}} = \text{GDOP} * \sigma_{\text{исх}},$$

где ошибка исходных данных $\sigma_{\text{исх}}$ характеризует интегрированную ошибку позиционирования радиомаяка и ошибку измерения дальности радиодальномером [9].

Поэтому в данной работе при разработке алгоритма в качестве оптимизационной функции выбрана функция *GDOP*.

Решается задача разработки алгоритма поиска множества геометрических конфигураций искусственного навигационного поля из N радиомаяков с минимальным значением *GDOP* в заданной прямоугольной области решения (ОР) ($X_{\text{size}} \times Y_{\text{size}}$), фиксированных координатах единственной точки коррекции $\{L_x, L_y, L_z\}$ (для упрощения будем считать, что проекция точки коррекции совпадает с центром координат, т.е. $L_x = L_y = 0$), цифровой карте высот и цифровой карте заштрихованных (для установки РМ) участков в пределах области решения.

Актуальность задачи обусловлена тем, что достижение высокой точности навигационных определений в системах радионавигации возможно только при "хорошей" конфигурации искусственного навигационного поля по геометрическому фактору [4].

С учетом специфики применения АСБРН время расчета конфигурации ИНП не должно превышать единиц минут. Поэтому ключевым требованием к разрабатываемому алгоритму является производительность. Это делает неприемлемым применение для решения задачи переборного подхода, трудоёмкость которого экспоненциально зависит от числа маяков.

Не менее важным требованием является устойчивость алгоритма к неблагоприятным входным данным. Вне зависимости от характера рельефа, числа и положения запрещённых для установки радиомаяков участков алгоритм должен генерировать максимально качественное решение для заданных условий. Это существенно ограничивает возможности для применения аналитического подхода в чистом виде.

Разработанный алгоритм поиска оптимальных конфигураций ИНП основан на *последовательной оптимизации опорных конфигураций ИНП*. Алгоритм базируется на переборе всех возможных вариантов размещения опорной конфигурации из двух РМ и ее последовательном расширении до требуемого числа РМ путем дополнения на каждом шаге одним радиомаяком, устанавливаемым в позицию, которая является оптимальной с учетом установленных на предыдущих шагах радиомаяков. Подход, применяемый в разработанном алгоритме, является эвристическим и позволяет получить множество решений, близких к глобальному оптимуму по критерию GDOP, за время, на несколько порядков меньшее, чем при использовании метода полного перебора радиомаяков. Высокая степень оптимальности решения, генерируемого предлагаемым алгоритмом, обеспечивается за счет комбинации свойств переборного метода, используемого для генерации опорных конфигураций из двух РМ и обеспечивающего устойчивость алгоритма, и методов оптимизации при наращивании конфигурации ИНП до требуемого числа РМ (с целью последовательного приближения решения к оптимальному).

Зависимость геометрического фактора от конфигурации радиомаяков.

С помощью программы для визуализации характера изменения значений GDOP при трансформации конфигурации ИНП и положения точки коррекции, разработанной автором [5], была поставлена серия экспериментов по исследованию влияния конфигурации радиомаяков на значение геометрического фактора, по результатам которых был сформулирован ряд положений, используемых при разработке алгоритма.

Положение 1: значение геометрического фактора $GDOP$ зависит только от взаиморасположения РМ друг относительно друга и относительно точки коррекции. Следовательно, для любой конфигурации РМ существует бесконечное число симметричных конфигураций, которые могут быть получены с помощью поворота текущей конфигурации на некоторый угол относительно точки коррекции.

Положение 2: перемещение РМ по лучу, исходящему из точки коррекции и проходящему через точку в исходной конфигурации не влияет на значение $GDOP$. Следовательно, задачу поиска оптимальных конфигураций маяков можно решать на плоскости, используя карту высот при переводе исходных координат в соответствующие им координаты на плоскости XY и обратно.

Положение 3: равномерное расположение на плоскости любого числа РМ по окружности относительно центра координат с радиусом $R_{opt} = \sqrt{2} \cdot L_z$ позволяет получить глобальный минимум геометрического фактора $GDOP$ для заданного

числа маяков. Такая конфигурация РМ соответствует правильной пирамиде с углами при основании, равными 45° , вершиной в точке коррекции и расположением N РМ в вершинах основания пирамиды.

Положение 4: глобальный минимум геометрического фактора $GDOP$ уменьшается по мере увеличения числа РМ. Справедливо также, что добавление РМ в любую позицию произвольной конфигурации, как минимум, не ухудшает значение геометрического фактора.

Положение 5: для двух РМ (A, B), расположенных на окружности с центром в начале координат O и радиусом $R_{1,2}$, локальный оптимум $GDOP$ достигается при расположении 3-го маяка (C) на луче, являющемся продолжением биссектрисы угла AOB , в точке на расстоянии R_3 от центра координат:

$$R_3 = \frac{L_z^2}{\sin\alpha \cdot R_{1,2}},$$

где α – угол при основании равнобедренного треугольника AOB .

Положение 6: для любых невырожденных конфигураций РМ ($N > 1$, положения хотя бы 2-х РМ различны) при расположении $N+1$ -го РМ на окружности с радиусом R_{N+1} и центром в начале координат зависимость $GDOP$ от угла α , определяющего положение $N+1$ -го маяка, является гладкой функцией с не более чем двумя минимумами.

Положение 7: для любых невырожденных конфигураций РМ при расположении $N+1$ -го РМ на луче, исходящем из начала координат под углом α , зависимость $GDOP$ от расстояния R_{N+1} является гладкой функцией с единственным минимумом.

Положение 8: для любых невырожденных конфигураций значение оптимального угла α для расположения $N+1$ -го РМ *незначительно* изменяется при изменении радиуса положения R_{N+1} , за исключением ближайшей окрестности центра координат. Следовательно, приближенный поиск оптимального угла α для расположения $N+1$ -го РМ может осуществляться на произвольном фиксированном радиусе положения, не входящем в ближайшую окрестность центра координат.

Положение 9: значение функции $GDOP$ в окрестности найденной оптимальной точки увеличивается по мере удаления от оптимума, причем наименьшая скорость роста значений $GDOP$ наблюдается при движении точки по направлению луча, исходящего из начала координат под оптимальным углом α , а наибольшая скорость роста – при движении точки в противоположном направлении (к началу координат).

Алгоритм поиска оптимальных конфигураций радиомаяков. Предлагаемый алгоритм *последовательной оптимизации опорных конфигураций радиомаяков* основан на последовательном достраивании опорных конфигураций до необходимого числа радиомаяков N на базе положений, описанных выше, и позволяет получить множество решений, близких к глобальному оптимуму, за приемлемое время.

Алгоритм не является точным, так как использует ряд эвристических допущений.

Допущение 1. В базовой версии алгоритма на каждом шаге жадно выбирается одно приблизительно оптимальное положение нового маяка для текущей конфигурации, которое может не приводить к глобальному оптимуму для N маяков, в отличие от другого положения маяка, неоптимального в данный момент, но приводящего к глобальному оптимуму. Несмотря на это допущение, за счет большого числа опорных конфигураций из двух маяков, генерируемых на этапе перебора опорных конфигураций, алгоритм сохраняет устойчивость и способен находить конфигурации, близкие к глобальному оптимуму без применения дополнительных формул или условий.

Допущение 2. После выбора угла α расположения маяка для поиска точки его размещения используется луч из центра координат под углом α . Более точным представлением является прямая, соединяющая оптимумы углов на разных радиусах, использование которой затруднено в виду трудоемкого расчета ближайших свободных точек в полярной сетке для большого числа допустимых прямых. Использование луча позволяет на порядок сократить трудоемкость этапа определения замен для запрещенных точек и выполнять его предварительно до запуска основной части алгоритма, незначительно влияя на точность решения.

Допущение 3. При поиске замен для запрещенных точек используется приближенный поиск ближайших клеток на дискретной неравномерной полярной сетке. Точная оценка скорости изменения функции GDOP по мере отдаления от точки в различных направлениях является сложной задачей, решение которой при заданной точности исходных данных и других допущениях является нецелесообразным. Более перспективным представляется повышение точности за счет правильного выбора характера неравномерности полярной сетки на основе результатов моделирования.

Рассмотрим этапы алгоритма.

Этап 1. Проецирование цифровой модели высот и карты запрещенных участков на плоскую область решения. Плоская область решения представляет собой участок на плоскости ($Z=0$), идентичный исходной области решения с точки зрения вычисления геометрического фактора. То есть каждой свободной точке исходной ОР должна соответствовать свободная точка в плоской ОР, а все остальные точки должны быть закрытыми.

Каждая точка исходной ОР (согласно Положению 2) имеет соответствующую ей точку (условимся называть такие точки *проекциями*) на плоскости $Z=0$, которую можно получить путем пересечения с плоскостью $Z=0$ луча, исходящего из точки коррекции и проходящего через точку в исходной области решения.

Вычислить проекции точек на плоскости можно аналитически с использованием стандартных геометрических операций (построение луча по двум точкам, пересечение луча с плоскостью). Таким образом, трудоемкость нахождения проекции для одной точки равна $O(1)$.

Для ускорения основной части алгоритма целесообразно выполнить предрасчет всех проекций заранее. Для этого достаточно найти проекции точек, являющихся вершинами в клетках исходной области решения, после чего последовательно выполнить «заливку» внутри четырехугольников на плоскости, соответствующих клеткам, значениями из ЦМР и флагами из карты запрещенных участков.

Трудоёмкость этапа: $O(X_{size} \times Y_{size})$.

Заметим, что размеры плоской ОР после проецирования могут быть как больше исходной ОР (при наличии возвышенностей на краях ОР), так и меньше исходной ОР (при наличии впадин на краях ОР). Кроме того, нескольким точкам исходной ОР может соответствовать одна точка плоской ОР (например, если направление склона совпадет с лучом из точки коррекции) – в этом случае при повторной заливке нельзя допускать установки флага запрещенного участка и обновления высоты, если ранее в точке был установлен флаг разрешенного участка.

Далее в описании алгоритма, за исключением оговоренных отдельно случаев, всегда будут использоваться проекции точек, а не точки исходной ОР.

Этап 2. Формирование полярной сетки на основе плоской области решения. Для выполнения операций поиска с привязкой к углу относительно центра координат, целесообразно предварительно сформировать сетку в полярной системе координат.

Закрытыми клетками в полярной сетке будем считать клетки, состоящие только из точек, запрещенных для установки РМ плоской ОР.

Свободными клетками в полярной сетке будем называть клетки, которые содержат хотя бы одну точку плоской ОР, в которой разрешена установка РМ. В качестве координат S_{ij} для свободной клетки используются координаты ближайшей к центру клетки точки плоской ОР, в которой разрешена установка РМ.

Реализовать построение клеток полярной сетки можно путем прохода по всем свободным точкам плоской ОР, вычисления полярных координат по стандартным формулам перевода декартовых координат в полярные, вычисления индекса клетки путем деления координат на шаг полярной сетки, и установки флага свободной клетки с обновлением координат S_{ij} клетки, при необходимости.

Трудоёмкость этапа: $O(R_{size} \times \phi_{size})$, где R_{size} – максимально допустимое расстояние от центра координат до РМ; ϕ_{size} – размерность полярной сетки по углу.

Целесообразно размеры сетки делать сопоставимым с размерами плоской ОР, поэтому для упрощения можно считать трудоёмкость этапа, как $O(X_{size} \times Y_{size})$.

Шаг сетки как по углу, так и по радиусу, может быть достаточно мелким, так как не будет оказывать влияния на трудоёмкость основного алгоритма.

Чтобы учесть зависимость, описанную в Положении 9, шаг сетки имеет смысл делать мельче по мере приближения к центру и крупнее по мере отдаления от него – в этом случае координаты, ближние к центру координат, будут рассматриваться позже, чем координаты, удаленные от центра. Другим способом является установка различных весов перехода между клетками: меньшие веса при приближении к центру координат, большие – при отдалении.

Этап 3. Предрасчет соответствий для клеток полярной сетки. *Соответствием* для клетки в полярной сетке будем называть координату, используемую при попытке установки радиомаяка в данную клетку. Для свободных клеток соответствием будут являться координаты клетки. Для закрытых клеток соответствие необходимо выбирать, руководствуясь Положением 9.

Предрасчет соответствий будет осуществляться методом поиска в ширину на графе (в случае различных весов перехода между клетками – волновым алгоритмом). Вершинами графа будут являться сами клетки полярной сетки, а ребра будут проложены между соседними по сторонам клеткам (по 4 соседа у каждой клетки, кроме крайних – 2–3 соседа) [8].

В начале для всех закрытых клеток задается пустое соответствие $H_{ij} = NULL$ (клетка, используемая при попадании в данную) и бесконечное расстояние до ближайшей свободной клетки $D_{ij} = \infty$ (выражается в числе шагов по клеткам). Для свободных клеток соответствием будут всегда являться вычисленные ранее координаты клетки: $H_{ij} = S_{ij}$, а расстояние будет равным $D_{ij} = 0$. После инициализации свободные клетки помещаются в очередь. Пока очередь не опустеет, будут выполняться попытки уменьшить расстояние в соседних клетках с последней извлеченной из очереди клеткой, и, в случае успеха, соседние клетки будут также помещаться в очередь. По окончании обработки все клетки сетки будут иметь соответствие H_{ij} .

Трудоёмкость этапа: $O(R_{size} \times \phi_{size})$. Данная трудоёмкость может быть аппроксимирована как $O(X_{size} \times Y_{size})$.

Этап 4. Перебор опорных конфигураций радиомаяков. Опорной конфигурацией РМ будем называть конфигурацию, генерация которой производится без вычисления целевой функции $GDOP$.

Оптимальное расположение первых двух РМ не может быть получено по каким-либо формулам или поисковым методам, так как для вычисления значения $GDOP$ необходима конфигурация, состоящая из трех и более маяков. Следовательно, в любой конфигурации есть как минимум два опорных маяка.

Установка опорных маяков может производиться экспертно или эвристически, однако в общем случае неправильный выбор расположения опорных РМ может существенно усложнить дальнейший поиск оптимальных решений. Это приводит к необходимости выполнения перебора по всем возможным расположениям опорных РМ, при этом рекомендуется ограничить число перебираемых РМ двумя [10].

Трудоемкость этапа: $O(K^2)$ – для двух перебираемых маяков.

На данном этапе для сокращения трудоемкости можно выполнить ряд оптимизаций, например, исключить из рассмотрения пары РМ, расположенные слишком близко друг к другу – очень вероятно, что на основе таких пар маяков сгенерировать хорошее решение не получится.

Целесообразно рассматривать не все свободные клетки, а объединять соседние группы клеток в укрупненные клетки с общими координатами в ближайшей свободной точке к центру группы – экспериментально подтверждается, что эта оптимизация незначительно влияет на качество получаемых решений.

Увеличение числа опорных РМ оправдано только в случае экспертного принятия решения по дополнительным маякам. В противном случае наблюдается недопустимо высокий рост трудоемкости вычислений.

Этап 5. Последовательная оптимизация опорной конфигурации радиомаяков. Под *последовательной оптимизацией опорной конфигурации РМ* понимается добавление в конфигурацию новых РМ вплоть до достижения требуемого числа N радиомаяков, осуществляемое таким образом, чтобы конфигурация была как можно ближе к оптимальной на текущем или последующих шагах оптимизации.

Поиск теоретически оптимальной точки установки радиомаяка. Теоретически оптимальной точкой установки радиомаяка будем считать точку, установка РМ в которую позволяет получить наиболее оптимальное решение без учета запрещенных областей и границ области решения.

Для приближенного поиска теоретически оптимальной точки установки РМ необходимо произвести 2 этапа вычислений:

- 1) Вычислить оптимальный угол α_i установки РМ для фиксированного радиуса дуги R_i , превышающего максимальное расстояние от начала координат до всех уже установленных РМ. Согласно Положению 6 зависимость $GDOP$ от угла установки маяка при фиксированном радиусе установки носит характер гладкой функции с двумя минимумами. Поэтому для реализации этого пункта предлагается использовать один из методов глобальной оптимизации – например, осуществлять разделение интервала $[0; 2\pi)$ на некоторое число подынтервалов и в каждом искать минимум функции $GDOP$ из расчета на то, что на подынтервале она имеет только один минимум. Для поиска минимума гладкой одноэкстремальной функции на подынтервалах предполагается использовать метод дихотомии, заключающийся в последовательном сужении интервала поиска до достижения требуемой точности по результатам сравнения двух значений строго внутри интервала [7].

В исключительных случаях (при очень близком расположении маяков друг к другу на ранних шагах оптимизации) два минимума могут попасть в один подынтервал. Это не является критичной ситуацией ввиду того, что оба минимума в та-

ком случае оказываются рядом, а поиск по углу заведомо производится с достаточно большой погрешностью, вызванной Допущением 2. Кроме того, конфигурации с близким расположением маяков друг к другу, как правило, заведомо не могут привести к оптимальному решению.

2) Найти оптимальную точку установки маяка на луче, исходящем из центра координат, и проходящем через полярную координату $\{R_i, \alpha_i\}$. Согласно Положению 7, характер зависимости $GDOP$ от радиуса установки маяка при фиксированном угле установки α является гладкой функцией с единственным минимумом, который можно также найти с помощью метода дихотомии [7].

Точка, полученная на шаге 2, является приближенно оптимальным результатом.

Теоретическая трудоемкость данного этапа складывается из трудоемкости метода глобальной оптимизации и трудоемкости вычисления функции $GDOP = O(N^3)$, выполняемой на каждом шаге поиска. Трудоемкость метода глобальной оптимизации можно оценить, как логарифмическую, но она может содержать большую скрытую константу, зависящую от требуемой точности и деталей реализации метода локальной оптимизации (например, числа рассматриваемых участков функции).

Трудоемкость этапа: $O(N^3 \log X)$, где X – определяемый требуемой точностью показатель.

Поиск результирующей точки установки радиомаяка. Найденная теоретически оптимальная точка установки РМ может быть использована для установки маяка без каких-либо дополнительных преобразований, если она не попадает в запрещенную область в плоской ОР.

В случае попадания точки установки в запрещенную область, необходимо использовать результаты предрасчета для получения соответствия запрещенной клетке, что позволит свести трудоемкость всего этапа до константы.

Трудоемкость этапа: $O(1)$

Суммарная трудоемкость алгоритма последовательной оптимизации опорных конфигураций радиомаяков. Суммарная трудоемкость разработанного алгоритма складывается как сумма трех предварительных этапов и произведения переборного и оптимизационного этапов. Предварительные этапы вносят незначительный вклад в суммарную трудоемкость, но не могут быть опущены из формулы, так как при маленьком числе свободных клеток K могут являться наиболее трудоемкой частью алгоритма.

Суммарная трудоемкость алгоритма: $O(Xsize \ Ysize) + O(K^2 \ N^4 \ \log X)$. Наблюдается линейная зависимость от размеров области ($Xsize$, $Ysize$), квадратичная от числа свободных клеток K , и полиномиальная (в 4-й степени) от числа маяков N .

Наиболее значимым фактором, влияющими на трудоемкость, как и в случае переборного решения, является число свободных клеток K в исходной области решения. Однако в разработанном алгоритме, в отличие от переборного решения, влияние числа свободных клеток на трудоемкость всегда постоянно и не зависит от числа маяков N .

Основные результаты экспериментальных исследований алгоритма. Для экспериментального исследования была разработана программа, реализующая представленный алгоритм [6]. По результатам проведенных экспериментов была подтверждена полиномиальная трудоемкость разработанного алгоритма.

При стандартных ограничениях на площадь области решения в 3км^2 и малой площади запрещенных для установки радиомаяков зон, время вычислений для 3-х маяков не превышает 1.5с, а для 8-ми маяков – 8.5 с.

Увеличение площади запрещенных для установки радиомаяков приводит к существенному сокращению трудоёмкости (0,1 с для 3-х радиомаяков, 0,6 с для 8-ми радиомаяков).

Для всех случайно сгенерированных схем области решения, вне зависимости от соотношения площадей разрешенных и запрещенных для установки радиомаяков зон области решения, отклонение значения GDOP в найденном алгоритмом решения от глобального оптимума не превышало сотых долей, что подтверждает высокую точность алгоритма.

При генерации заведомо неблагоприятных схем области решения (например, покрытие половины области решения по одну сторону от точки коррекции запрещенными областями) время работы алгоритма не увеличивалось, а качество найденных решений стремилось к локальному оптимуму для заданных областей решения.

Заключение. Описанный в работе алгоритм последовательной оптимизации опорных конфигураций радиомаяков благодаря своим точностным характеристикам, устойчивости к неблагоприятным исходным данным и низкой вычислительной трудоёмкости может применяться на практике для решения задачи поиска оптимальных конфигураций ИНП.

В ходе дальнейших исследований предполагается более глубокое теоретическое обоснование положений, используемых в разработанном алгоритме, и более подробное исследование промежуточных этапов алгоритма с применением методов оптимизации.

Существенное сокращение трудоёмкости алгоритма может быть достигнуто за счет формирования опорных двухмаяковых конфигураций случайным образом. Вопрос оценки минимального количества генерируемых вариантов опорных двухмаяковых конфигураций, которое обеспечивало бы получение с заданной степенью надежности решения, не уступающего решению по предлагаемому алгоритму, требует проведения дополнительных исследований и экспериментов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания по теме "Информационно-алгоритмическое обеспечение систем цифрового управления, автономной высокоточной навигации и технического зрения для перспективных летательных аппаратов: разработка теоретических основ проектирования, алгоритмов, способов эффективной и надежной программной реализации, использование высокопроизводительной вычислительной инфраструктуры для экспериментального моделирования".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хусаинов Н.Ш., Кравченко П.П., Щербинин В.В., Шаповалов А.Б. Анализ составляющих ошибки навигации и наведения летательного аппарата, использующего для коррекции движения автономную систему ближней радионавигации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 55-59.
2. Khusainov, N.Sh. Algorithm of identification of optimal location of correction zones of a flying device's coordinates // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 28. – P. 854-859.
3. Хусаинов Н.Ш. Принципы построения информационно-алгоритмического обеспечения перспективных систем определения местоположения ЛА по информации от автономной системы ближней радионавигации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2007. – № 2 (77). – С. 130-135.
4. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцев Н.В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Под ред. В.С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
5. Тарасов С.А., Кравченко П.П., Хусаинов Н.Ш. Программа визуализации результатов расчета параметров рекомендуемой геометрической конфигурации радиомаяков для системы ближней радионавигации. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611347. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.01.2013г. Заявка № 2012660573 от 03.12.2012.

6. *Tarasov S.A., Хусаинов Н.Ш., Кравченко П.П.* Программа поиска оптимальных конфигураций искусственного навигационного поля для АСБРН. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611117. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.01.2014. Заявка № 2013661046 от 29.11.2013.
7. *Васильев Ф.П.* Методы оптимизации. – М.: Факториал пресс, 2002. – 824 с.
8. *Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C.* Introduction to Algorithms (3 ed.). – The MIT Press – 2009. – 1312 p.
9. *Langley R.B.* Dilution of Precision // GPS World. – 1999. – № 5. – P. 52-59.
10. *Knuth D.E.* The Art of Computer Programming, 4, Fascicle 3: Generating All Combinations and Partitions. – Massachusetts: Addison-Wesley Professional, 2005. – 160 p.

REFERENCES

1. *Khusainov N.Sh., Kravchenko P.P., Shcherbinin V.V., Shapovalov A.B.* Analiz sostavlyayushchikh oshibki navigatsii i navedeniya letatel'nogo apparata, ispol'zuyushchego dlya korrektsii dvizheniya avtonomnyuyu sistemu blizhney radionavigatsii [Analysis of navigation and guidance error components of airborne vehicle's using for motion correction autonomous local radio navigation system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 3 (104), pp. 55-59.
2. *Khusainov, N.Sh.* Algorithm of identification of optimal location of correction zones of a flying device's coordinates, *World Applied Sciences Journal*, 2013, No. 28, pp. 854-859.
3. *Khusainov N.Sh.* Printsipy postroeniya informatsionno-algoritmicheskogo obespecheniya perspektivnykh sistem opredeleniya mestopolozheniya LA po informatsii ot avtonomnoy sistemy blizhney radionavigatsii [The principles of building information and algorithmic support of advanced systems determine the location of LA according to information from the Autonomous system near radionavigation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2007, No. 2 (77), pp. 130-135.
4. *Shebshaevich V.S., Dmitriev P.P., Ivantsev N.V.* Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy [Network satellite navigation system]. 2nd ed. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 408 p.
5. *Tarasov S.A., Kravchenko P.P., Khusainov N.Sh.* Programma vizualizatsii rezul'tatov rascheta parametrov rekomenduemoi geometricheskoy konfiguratsii radiomayakov dlya sistemy blizhney radionavigatsii [Program visualization results of calculation of parameters recommended geometric configuration of the radio system for short-range radio navigation]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2013611347. Zaregistrirovano v Reestre programm dlya EVM 09.01.2013g. Zayavka № 2012660573 ot 03.12.2012.
6. *Tarasov S.A., Khusainov N.Sh., Kravchenko P.P.* Programma poiska optimal'nykh konfiguratsiy iskusstvennogo navigatsionnogo polya dlya ASBRN [Search for optimal configurations of artificial navigation field for ASBRN]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2014611117. Zaregistrirovano v Reestre programm dlya EVM 24.01.2014. Zayavka № 2013661046 ot 29.11.2013.
7. *Vasil'ev F.P.* Metody optimizatsii [Optimization methods]. Moscow: Faktorial press, 2002, 824 p.
8. *Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C.* Introduction to Algorithms (3 ed.). The MIT Press, 2009, 1312 p.
9. *Langley R.B.* Dilution of Precision, *GPS World*, 1999, No. 5, pp. 52-59.
10. *Knuth D.E.* The Art of Computer Programming, 4, Fascicle 3: Generating All Combinations and Partitions. Massachusetts: Addison-Wesley Professional, 2005, 160 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Карелин.

Тарасов Сергей Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: coderts@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79054535835; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; аспирант.

Tarasov Sergey Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: coderts@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79054535835; the department of software engineering; postgraduate student.