**Применение генетического алгоритма для определения мест размещения опорных точек локальной навигационной системы и минимизации их числа**

**Никита Игоревич Петухов** – аспирант кафедры Радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: [PetukhovNI@mpei.ru](mailto:PetukhovNI@mpei.ru) SPIN-код: отсутствует

**Дмитрий Викторович Царегородцев** – аспирант кафедры Радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: [TsaregorodtsDV@mpei.ru](mailto:TsaregorodtsDV@mpei.ru) SPIN-код: отсутствует

**Роман Сергеевич Куликов** – к.т.н., директор Института радиотехники и электроники, заведующий кафедрой Радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: [KulikovRS@mpei.ru](mailto:KulikovRS@mpei.ru) SPIN-код: 6132-5082

**Александр Павлович Малышев** – студент кафедры Радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: [MalyshevAP@mpei.ru](mailto:MalyshevAP@mpei.ru) SPIN-код: отсутствует

**Nikita Igorevich Petukhov –** PostgraduateStudent, Department of Radio Systems, «National Research University «MPEI» (Moscow)

**Dmitry Viktorovich Tsaregorodtsev –** PostgraduateStudent, Department of Radio Systems, «National Research University «MPEI» (Moscow)

**Roman Sergeevich Kulikov** – Ph.D. (Eng.), Director of the Institute of radio engineering and electronics, Head of radio systems department, «National Research University «MPEI» (Moscow)

**Alexander Pavlovich Malyshev –** Student, Department of Radio Systems, «National Research University «MPEI» (Moscow)

**Аннотация**

В настоящей работе поставлена задача минимизация числа опорных точек (ОТ) позиционной локальной навигационной системы (ЛНС) внутри помещений и оптимизация их размещения по критерию обеспечения среднего по пространству геометрического фактора не хуже заданного. Насколько известно авторам, такая задача ставится и решается впервые. Предлагается приближённое численное решение поставленной задачи на основе генетического алгоритма. Эффективность предложенного метода оценивается путём моделирования размещения различного числа ОТ дальномерной ЛНС в помещениях различной конфигурации и сравнения результата с квази-оптимальным результатом полного перебора всех возможных размещений ОТ ЛНС. Делается вывод о применимости предложенного метода для решения поставленной задачи и перспективности построения на его основе инструмента автоматизации процесса проектирования позиционных ЛНС с целью сокращения времени проектирования и стоимости инфраструктуры.

**Abstract**

In this paper, the problem of minimization of the number of an indoor local navigation system (LNS) anchors and of anchors’ placement optimization is posed according to the criterion of ensuring the factor of geometric delusion of precision (GDOP) averaged over the space is not worse than a given one. According to authors’ best knowledge, this is the first time such a problem has been posed and solved. An approximate numerical solution to the problem based on a genetic algorithm is proposed. The effectiveness of the proposed method is assessed by simulating the placement of a different amounts of ranging LNS anchors in rooms of various configurations and comparing the result with the quasi-optimal result of a complete numerical search of all possible locations of the LNS anchors. The conclusion is made on the applicability of the proposed method for solving the problem and the prospects of building on its basis a tool for automating the development of positional LNS to reduce the development time and the cost of infrastructure.

**Введение**

Развитие техники приводит к появлению и распространению на практике локальных навигационных систем (ЛНС) для получения координатных определений внутри помещений, где сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) отсутствуют. Наиболее эффективными являются ЛНС, реализующие позиционный метод навигации; «платой» за эту эффективность является необходимость развёртывания и поддержания инфраструктуры навигационных опорных точек (ОТ), что возможно в большинстве практических случаев. Предметом настоящей статьи является метод определения мест размещения ОТ позиционной ЛНС и их числа.

Кроме позиционных ЛНС также встречаются корреляционно-экстремальные (обзорно-сравнительные) ЛНС, т. наз. «fingerprinting» в англоязычной литературе, и навигационная аппаратура потребителей, реализующая метод счисления пути (инерциальная, одометрическая, визуально-одометрическая). Также имеются их гибриды, т. наз. «SLAM» (англ. simultaneous localization and mapping – одновременное позиционирование и картографирование). Эти подходы в настоящей статье не рассматриваются.

Вне зависимости от базовой технологии (ультразвуковой, радио, лазерной, оптической) и от способа решения навигационной задачи (дальномерного, разностно-дальномерного, суммарно-дальномерного, псевдо-дальномерного, угломерного, угломерно-дальномерного, угломерно-разностно-дальномерного или угломерно-суммарно-дальномерного) точность навигационных определений в позиционной ЛНС существенно зависит от числа наблюдаемых ОТ и их расположения относительно потребителя. Эту зависимость в радионавигации принято характеризовать скалярным параметром – геометрическим фактором [1, 2], который в случае независимости погрешностей «сырых» измерений навигационных параметров и равенства их дисперсий рассчитывается следующим образом:

где – оператор следа квадратной матрицы (суммы её диагональных элементов); – градиентная матрица, матрица частных производных вектора «сырых» измерений радионавигационных параметров по вектору состояния (по планарным координатам потребителя в настоящем случае).

В первом приближении для простоты можно считать, что среднеквадратическое значение (СКЗ) случайной погрешности координатных определений в раз выше СКЗ измерений радионавигационных параметров (дальностей и др.). Геометрический фактор – функция координат потребителя, то есть его значение различно в разных частях рабочей зоны.

Если в случае ГНСС навигационные космические аппараты, играющие роль ОТ, всегда находятся «далеко» от рабочей зоны – околоземного пространства – и потребители всегда «окружены» опорными точками (за исключением случаев заслонений, например, в городе или в горах) и не приближаются к ним, то в случае ЛНС потребители перемещаются между ОТ и геометрический фактор меняется при этом на порядки. Это проявляется в том, что в некоторых местах, где имеется поле навигационных сигналов ЛНС, возникают «аномальные» выбросы погрешности координатных определений, так как при некоторых конфигурациях размещения ОТ относительно потребителя численное решение нелинейной навигационной задачи (определение координат по измерениям навигационных параметров) теряет устойчивость ввиду чувствительности к флуктуациям шума наблюдения.

На практике при проектировании и развёртывании ЛНС для навигации внутри помещений для избегания таких выбросов в наиболее востребованной части площади рабочей зоны, для оттеснения их мало к используемым углам помещений, для снижения уровня пиков значений геометрического фактора используют заведомо избыточное число ОТ, расставляя их по помещению «по наитию». Это заметно повышает стоимость и трудозатраты по развёртыванию ЛНС, так как каждая ОТ имеет стоимость, к каждой ОТ нужно подвести питание и обеспечить коммуникацию с сегментом управления, каждую ОТ нужно закрепить и привязать к локальной системе координат. Промышленные предприятия и организации имеют запрос не только на повышение точности навигационных определений (зачастую она достаточна и не требует улучшения), но и на снижение стоимости ЛНС без потери качества её работы. Этого можно достичь путём оптимизации числа ОТ и мест их размещения.

В статье [7] представлены рекомендации по размещению ОТ ЛНС по результатам анализа геометрического фактора при построении ЛНС на открытой местности и зарегистрирована программа для оценки геометрического фактора такой ЛНС [8]. В докладе [9] предложен аналитический метод размещения ОТ позиционной ЛНС путём оптимизации параметров вводимого авторами подпространства и доказана необходимость размещения ОТ по периметру рабочей зоны; при этом влияние помещения не учитывается. В докладе [10] описан эксперимент по оценке влияния размещения внутри помещения ОТ позиционной ЛНС на основе сверхширокополосного (СШП) радио. На сайте известного производителя позиционных СШП ЛНС [11] указывается на необходимость учёта геометрического фактора при проектировании и развёртывании ЛНС. В докладе [12] представлена программа для оценки геометрического фактора СШП ЛНС с учётом плана помещения и размещения ОТ.

В известных авторам источниках, а также в среде специалистов, занимающихся проектированием, развёртыванием и эксплуатацией ЛНС, вопрос о решении общей задачи оптимизации числа ОТ и их размещения с учётом плана здания не ставится ввиду её сложности. Насколько известно, это первая в своём роде попытка разработать методы размещения ОТ ЛНС внутри помещений, близкие к оптимальным (критерий оптимальности далее).

Если для открытого пространства задача оптимального размещения ОТ позиционной системы навигации имеет тривиальное решение (максимальный разнос ОТ по наблюдаемому сегменту сферы пространства), то в случае навигации внутри помещения наличие непрозрачных для навигационных сигналов стен, перегородок, оборудования и т.п. осложняет задачу обеспечения навигационного покрытия.

**Постановка** **задачи**

Пусть имеется закрытое помещение произвольной планировки, в том числе в помещении могут быть непроницаемые для навигационных сигналов перегородки, колонны, технологическое оборудование, мебель и пр. Пусть имеется позиционная ЛНС в составе некоторого числа ОТ, устанавливаемых в помещении, и носимой навигационной аппаратуры потребителя (НАП). Пусть дальность действия ОТ превышает размеры помещения. Пусть отсутствует систематическая погрешность измерения радионавигационных параметров и влияние многолучевого распространения навигационных сигналов несущественно (это в первом приближении выполняется для ультразвуковых, лазерных, оптических и сверхширокополосных радиотехнических ЛНС). Пусть все ОТ размещены на известной высоте, НАП также находится на известной высоте, пол в помещении горизонтальный и ровный. ЛНС обеспечивает двумерные координатные определения в плане (результат можно без труда обобщить и на трёхмерный случай).

Погрешность координатных определений, нормированная на СКЗ «сырых» измерений радионавигационных параметров (для простоты и без потери общности она считается одинаковой для всех ОТ и для всей площади помещения, что обычно выполняется на практике), в целом характеризуется усреднённым по помещению геометрическим фактором :

где – площадь помещения; – планарные координаты в пределах помещения. Интегрирование (2) на практике приближённо заменяется суммированием по узлам сетки координат с шагом порядка 0.1..1 м.

Нужно предложить метод определения минимального числа ОТ и мест их размещения в помещении , обеспечивающий значение среднего геометрического фактора не хуже заданного :

или констатировать невозможность выполнения условия (3) ни при каких размещениях и числе ОТ .

Задача не имеет приемлемого для практики решения, если заданное значение среднего геометрического фактора слишком мало. Типичным значением заданного среднего по пространству геометрического фактора, например, для дальномерной позиционной ЛНС является . Отметим также, что оценка координат возможна, если число «сырых» измерений радионавигационных параметров не ниже размерности вектора координат потребителя (двумерного в поставленной задаче). Поэтому для дальномерного и угломерного способов , для разностно-дальномерного , для угломерно-дальномерного и т.д.

В неявном виде через (3) задаётся требование на среднюю по пространству рабочей зоны (по помещению) точность навигационных определений: СКЗ флуктуационной погрешности в раз больше СКЗ исходных («сырых») измерений навигационных параметров, определяемых технологией ЛНС. Например, с помощью СШП радио стандарта IEEE 802.15.4z-2020 запросным способом дальности измеряются с СКЗ погрешности порядка 0.05..0.1 м, разности дальностей беззапросным способом – порядка 0.1..0.5 м, а угловое направление фазовым методом – порядка 2о..5о (двухэлементная антенная решётка с базой см, где см – длина волны СШП радиосигнала с центральной частотой 6 ГГц). Погрешности ультразвуковых измерений имеют тот же порядок, а погрешности оптических и лазерных измерений на порядок меньше.

**Алгоритм решения задачи оптимизации размещения ОТ ЛНС**

В общем виде не существует аналитического решения задачи оптимизации числа ОТ ЛНС и/или их размещения в помещении произвольной формы, поэтому метод решения выбирается из класса численных методов. Отметим, что задача поиска размещения, обеспечивающего глобальный минимум значения среднего геометрического фактора при том или ином числе ОТ , в данной статье не ставится, достаточно выполнения условия (3). При этом наличие более одного суб-оптимального решения также имеет ценность: та или иная конфигурация размещения может оказаться предпочтительной с точки зрения особенностей конкретного помещения.

Численным методом решения задачи является прямой перебор всех возможных размещений ОТ и расчёт (2) для каждого размещения, проводимые для каждого числа ОТ, начиная с которого возможна оценка координат, с постепенным увеличением числа до тех пор, пока не будет выполнено условие (3). Перебор в пространстве непрерывных координат имеет бесконечную вычислительную сложность и его приближённо заменяют перебором по дискретной сетке координат. Однако даже такой расчёт имеет слишком большую вычислительную сложность. Например, перебор возможных размещений всего шести ОТ в относительно небольшом помещении площадью 1 тыс. м2 с грубым шагом 0.5 метра состоит из порядка 1024 вариантов, для каждого из которых требуется рассчитывать среднее значение геометрического фактора (2). Поэтому перебор должен быть приближённо заменён тем или иным численным методом, который на порядки снизит вычислительную нагрузку, незначительно при этом проигрывая в точности.

Оптимизация численными методами Монте-Карло для решения той же задачи потребует порядка 1012.. 1015 случайных векторов координат ОТ, что сильно меньше перебора, но всё ещё неприемлемо много для практической реализации.

Одним из перспективных численных методов оптимизации являются итерационные *генетические алгоритмы*. Схему генетических алгоритмов предложил Дж. Холланд в 1975 году [3], а его ученик Д. Голдберг разработал первый алгоритм, получивший название генетического [4]. Этот эвристический метод является имитацией природного механизма передачи наследственной информации в генах и естественного отбора наиболее приспособленных. Подробнее ознакомиться с теорией генетических алгоритмов и практикой их применения для решения оптимизационных задач можно, например, в [5, 6].

Считается, что генетические алгоритмы хорошо подходят для оптимизации функций многих переменных с множеством экстремумов. Генетические алгоритмы не гарантируют отыскание глобального оптимума, но с высокой вероятностью отыскивают оптимумы, близкие по уровню к глобальному, за короткое время (относительно малое число итераций), при этом требуют относительно небольшие вычислительные ресурсы.

В основе генетических алгоритмов лежит представление области решений в виде случайной выборки из значений вектора – в нашем случае выборки из вариантов размещения ОТ, описываемых векторами координат размерности каждый.

Перед инициализацией задают план помещения – рабочую зону ЛНС с привязкой к системе координат и разбивают её координатной сеткой с некоторым шагом . Также задаются начальным числом ОТ. При инициализации (на нулевой итерации генетического алгоритма) случайным образом формируют выборку векторов , каждый из которых задаёт вариант размещения ОТ в двумерной координатной сетке.

На каждой -й итерации работы генетического алгоритма на основе нелинейного случайного преобразования векторов (имитирующего *кросинговер* – природный механизм обмена генами, отсюда название алгоритма) из предыдущей выборки происходит формирование новой промежуточной выборки объёмом векторов такой же размерности. Преобразование векторов заключается в следующем. Случайным образом выбирают пару векторов из предыдущей выборки:

где – индексы векторов в выборке; – координаты -й ОТ, ; – операция транспонирования.

Далее случайным равновероятным образом выбирается значение индекса , и векторы и «разрезаются» на две части каждый:

где

Далее из первой половины -го вектора и второй половины -го вектора формируется новый предварительный вектор новой промежуточной выборки:

где – индекс векторов в новой промежуточной выборке.

По сути, новый предварительный вариант размещения ОТ образуется в виде случайного сочетания двух предыдущих: размещение первых ОТ берётся из вектора , а размещение оставшихся ОТ берётся из вектора .

Далее предварительный вектор подвергается ещё одному случайному нелинейному преобразованию: с вероятностью координаты случайно выбранной ОТ , в составе заменяются на случайные в пределах рабочей зоны (тем самым имитируется природный механизм *мутаций*), в результате чего образуется новый вектор новой промежуточной выборки То есть в предварительном варианте размещения ОТ , который составлен из частей предыдущих размещений и , с вероятностью размещение одной из ОТ меняется случайным образом, образуя новый промежуточный вариант размещения.

Процесс образования новых промежуточных векторов повторяется раз.

Далее для каждого вектора , из новой промежуточной выборки и из предыдущей выборки , оценивается значение показателя качества – в нашем случае среднего геометрического фактора . После чего из этих векторов формируется новая выборка объёмом . Отбор векторов в новую выборку может производиться по тому или иному правилу, параметром которого является значение показателя качества вектора (тем самым имитируется природный механизм *естественного отбора*). В нашем случае применено простое правило: в новую выборку поступают векторов из числа , и , с наименьшими значениями среднего геометрического фактора .

После формирования новой выборки происходит переход на следующую, итерацию алгоритма, и действия рекуррентно повторяются, пока не сработает критерий останова: либо достижение целевого показателя, либо стабилизация решения (невязка наилучших значений показателя качества на соседних итерациях становится ниже порога) либо превышение максимального числа итераций . Стабилизация решения в окрестности некоторого оптимума (глобального – возможно, но не гарантировано) фиксируется по выполнению условия:

где – глубина ретроспективного сравнения минимальных средних значений геометрического фактора; – невязка средних значений геометрического фактора, ниже которой оптимизация теряет смысл. Порог невязки и максимальное число итераций подбираются эмпирически.

Результатом работы алгоритма является вектор в финальной выборке с наименьшим значением среднего геометрического фактора. Генетический алгоритм с высокой вероятностью выявляет основные экстремумы оптимизируемой функции, но не гарантирует обнаружение главного экстремума. После остановки алгоритма для текущего значения числа ОТ производят сравнение достигнутого среднего значения геометрического фактора с заданным по условию (3). Если условие выполнено, задача получила своё приближённое решение, фиксируются и соответствующий вариант размещения ОТ . Если условие не выполнено, то есть достигнутое значение , то число ОТ увеличивается на 1 и генетический алгоритм запускается ещё раз. Условие (3) выполнится при минимально возможном числе ОТ с вероятностью обнаружения генетическим алгоритмом основных минимумов оптимизируемого среднего геометрического фактора. Чтобы избежать возможного зацикливания при небольших значениях заданного геометрического фактора , когда решение задачи получить невозможно, целесообразно ограничить максимальное значение числа ОТ , подбираемого эмпирически.

Описанные варианты организации описанных случайных процедур не являются строго определёнными и возможны их модификации, приводящие к другим вариантам генетического алгоритма. К примеру, имеются нестационарные варианты генетических алгоритмов, когда структура (например, правило отбора) и/или параметры (например, вероятность мутаций) меняются в процессе работы алгоритма. Нестационарность обеспечивает вначале глобальный поиск экстремумов оптимизируемой функции, а затем «точную настройку» вблизи выявленных экстремумов.

Подходящие для практики результаты работы по генетическому алгоритму достигаются при объёме выборки порядка 101..102  векторов, из которых на каждой итерации производят порядка 102..104 векторов промежуточной выборки, что является вполне посильной нагрузкой для современных вычислительных средств.

Все эти особенности являются эвристическими и имитируют те или иные особенности эволюции живой природы. Насколько известно, не существует формализованных правил подбора наилучшей структуры генетического алгоритма и его параметров – разработчики действуют методом проб и ошибок, накапливают опыт применения в типовых задачах. Тем не менее, несмотря на описанную структурную и параметрическую неопределённость, генетические алгоритмы относительно хорошо показывают себя в классе задач, плохо поддающихся аналитическому решению (множество экстремумов, недифференцируемость, неустойчивость решения, сильная зависимость от начальных условий) или решению стохастическими методами Монте-Карло (большая размерность, слишком высокие требования к вычислительной мощности). В целом, ценой усложнения операций, генетические алгоритмы обходятся на несколько порядков меньшим числом особей, чем более простые методы Монте-Карло (которые в свою очередь экономят несколько порядков вычислительной сложности по сравнению с прямым перебором); при этом генетические алгоритмы не имеют ограничений на вид оптимизируемой функции, в отличие от аналитических методов.

Таким образом, решать поставленную задачу по определению размещения ОТ ЛНС для обеспечению качества навигационного покрытия в помещении произвольной формы не хуже заданного (3) при минимальном числе ОТ предлагается генетическим алгоритмом с постепенным увеличением числа ОТ до срабатывания критерия останова.

В местах отсутствия полноценного навигационного покрытия (радиовидимости между потребителем и достаточным числом ОТ) геометрический фактор не имеет смысла, а на границах рабочей зоны он стремится к бесконечности. В этих условиях сравнить средние значения геометрических факторов разных конфигураций ЛНС с неполным покрытием помещения некорректно. Однако навигация в помещении позволяет ограничить сверху погрешность координатных определений размерами помещения вне зависимости от качества навигационных измерений и вообще наличия навигационного поля. Это в некотором смысле равнозначно директивному ограничению максимального значения геометрического фактора . Таким образом предлагается считать значение геометрического фактора в «проблемных» зонах помещения равным , таким, чтобы пересчитанное СКЗ погрешности координатных определений было сопоставимо с размерами помещения. Например, для дальномерной СШП радиотехнической ЛНС осмысленное значение .

Свободными параметрами предлагаемого алгоритма являются:

* шаг координатной сетки ;
* максимальное расчётное значение геометрического фактора ;
* объём выборок ;
* объём промежуточных выборок ;
* вероятность случайного изменения предварительного вектора ;
* максимальное число итераций ;
* минимальная невязка ;
* глубина ретроспективы .

Как уже говорилось, это не единственный вариант структуры генетического алгоритма, однако он является относительно простым и служит отправной точкой для исследования эффективности генетических алгоритмов для решения поставленной задачи оптимизации мест размещения ОТ ЛНС в помещении.

**Моделирование**

Оценим эффективность предлагаемого метода на основе генетического алгоритма. Для этого смоделируем несколько вариантов помещений и определим места размещения ОТ дальномерной позиционной ЛНС для нескольких значений числа ОТ . Для оценки верности результатов сравним результаты работы генетического алгоритма с результатами полного перебора. На рисунке 1 представлены три варианта планов комнат в условных безразмерных единицах длины: А, Б и В. Комната А является самой простой для задачи оптимизации размещения ОТ, так как она наиболее близка к свободному пространству. Комната Б заметно сложнее, так как ОТ из одного её конца, несмотря на достаточную дальность действия, не может принять или передать навигационные сигналы потребителю в другом конце; единственным местом, откуда «видна» вся рабочая зона, является центральный участок, где оба крыла комнаты смыкаются. Комната В, посередине которой имитируется технологическое оборудование, мебель или перегородка – самая сложная, так как нет ни одного участка, из которого бы наблюдалась вся рабочая зона. В целом комбинация таких типов помещений позволяет смоделировать большинство реальных планировок.



Рисунок 1 – Три варианта комнат различной сложности

Параметры моделируемого генетического алгоритма: ; ; ; ; , , , . Рассматривается размещение ОТ.

На рисунке 2 представлен результат решения самой простой задачи: три ОТ в прямоугольной комнате А, свободной от препятствий. Видно, что генетический алгоритм разместил ОТ аналогично перебору: максимально разнёс их по рабочей зоне. Перебор обеспечил более равномерные значения геометрического фактора в разных частях рабочей зоны и чуть меньшее значение среднего геометрического фактора .





Рисунок 2 – Размещение трёх ОТ в простой комнате А. Слева результат работы генетического алгоритма (размещение ОТ, геометрический фактор). Справа аналогичные результаты прямого перебора

На рисунке 3 представлены результат решения немного более сложной задачи по размещению шести ОТ в той же комнате. Видно, что эволюция генетического алгоритма также верно «уловила» конфигурацию по равномерному заполнению периметра комнаты опорными точками. Прямой перебор также привёл к аналогичному решению (но с чуть более низким средним значением геометрического фактора).





Рисунок 3 – Размещение шести ОТ в простой комнате А. Слева результат работы генетического алгоритма (размещение ОТ, геометрический фактор). Справа аналогичные результаты прямого перебора

На рисунке 4 представлен результат решения более сложной задачи по размещению пяти опорных точек в Г-образной комнате Б. Видно, что генетический алгоритм разместил опорные точки по-своему, отличным от наилучшего варианта в результате перебора. Однако при ближайшем рассмотрении выясняется, что логика разделения общего числа ОТ на две триады и размещения триад в крыльях помещения идентична. Достигнутое при этом среднее значение геометрического фактора генетического алгоритма мало отличается от квази-оптимального, то есть вариант, предложенный генетическим алгоритмом, по эффективности мало уступает результату перебора и вполне пригоден.





Рисунок 4 – Размещение пяти ОТ в Г-образной комнате Б. Слева результат работы генетического алгоритма (размещение ОТ, геометрический фактор). Справа аналогичные результаты прямого перебора

Видно, что с помощью предлагаемого алгоритма удалось разместить ОТ таким образом, что в каждой точке помещения имеется возможность передачи навигационного сигнала между НАП и не менее трёх ОТ. В этом смысле генетический алгоритм повторил принцип наилучшего размещения перебором.

На рисунке 5 представлен результат неудачного применения генетического алгоритма: при размещении шести ОТ в комнате В с препятствиями прямой перебор позволил выявить такое размещение ОТ, при котором в каждой точке помещения обеспечивается навигационное покрытие, а генетический алгоритм с этой задачей не справился и в помещении остались места с некачественным навигационным покрытием, в которых действительное значение геометрического фактора превысило и для задачи сравнения было жёстко ограничено на этом уровне. Перебор привёл к разделению ОТ на триады и их симметричное размещение по «коридорам». Генетический алгоритм «справился» с этим в трёх коридорах из четырёх, в четвёртом вместо триады наблюдается лишь пара ОТ.





Рисунок 5 – Размещение шести ОТ в сложной комнате В. Слева результат работы генетического алгоритма (размещение ОТ, геометрический фактор). Справа аналогичные результаты прямого перебора

На рисунке 6 представлен результат решения самой вычислительно сложной задачи: размещения восьми ОТ в комнате В с препятствиями. Видно, что эволюция размещения ОТ по генетическому алгоритму стабилизировалась вокруг варианта, отличающегося от наилучшего варианта перебора. Хотя среднее значение геометрического фактора отличается от наилучшего, полученного перебором, не очень сильно, понятно, что близкое расположение одной ОТ возле другой является избыточным и не даёт преимущества.





Рисунок 6 – Размещение восьми ОТ в сложной комнате В. Слева результат работы генетического алгоритма (размещение ОТ, геометрический фактор). Справа аналогичные результаты прямого перебора

В таблице 1 собраны средние значения геометрического фактора по всем вариантам размещений во всех трёх комнатах. Из таблицы видно, что генетический алгоритм успешно справляется с поставленной задачей в большинстве случаев: сокращая объём вычислений на несколько порядков, обеспечивает значение среднего геометрического фактора, уступающее лучшим результатам перебора всего на 1..14%. То есть с простыми задачами генетический алгоритм справляется практически так же, как прямой перебор. В более сложных задачах генетический алгоритм приводит к суб-оптимальным решениям, качество которых уступает результатам перебора как правило на 25..36%.

Таблица 1 – Средние значения геометрического фактора

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Количество ОТ | Комната А | | | Комната Б | | | | Комната В | | |
| Генетический алгоритм | Перебор | Относительный проигрыш | Генетический алгоритм | Перебор | Относительный проигрыш | Генетический алгоритм | | Перебор | Относительный проигрыш |
| 3 | 1.22 | 1.21 | 1% | 2.16 | 2.11 | 2% | 9.96 | | 9.86 | 1% |
| 4 | 1.03 | 1.01 | 2% | 1.64 | 1.48 | 11% | 9.52 | | 8.73 | 9% |
| 5 | 0.92 | 0.89 | 3% | 1.26 | 1.19 | 6% | 7.30 | | 5.35 | 36% |
| 6 | 0.83 | 0.80 | 4% | 1.11 | 1.07 | 4% | 4.11 | | 1.83 | 125% |
| 7 | 0.78 | 0.73 | 7% | 1.04 | 0.95 | 9% | 1.54 | | 1.23 | 25% |
| 8 | 0.73 | 0.66 | 11% | 0.98 | 0.86 | 14% | 1.39 | | 1.06 | 31% |

Задавшись желательным значением среднего геометрического фактора , метод позволяет (см. таблицу 1) определить минимальное число ОТ ЛНС, его обеспечивающее. Например, навигационное покрытие с в комнате А обеспечивается при числе ОТ , а в комнатах Б и Г при и соответственно. В этом состоит шаг выбора минимального числа ОТ, при котором обеспечивается значение среднего геометрического фактора, пересчитываемого в СКЗ погрешности координатных определений, не хуже заданного.

**Заключение**

Предложенный метод на основе генетического алгоритма можно с успехом использовать для приближёного численного решения поставленной задачи: минимизировать число ОТ ЛНС, тем самым сокращая её стоимость, при заданном значении среднего по помещению геометрического фактора. Дополнительным полезным результатом является оценка геометрического фактора по всей площади рабочей зоны , которую можно легко пересчитать в оценку СКЗ погрешности координатных определений по всей рабочей зоне, умножив на СКЗ «сырых» измерений навигационных параметров. Предложенный метод подходит для оптимизации позиционной ЛНС любого типа (дальномерной, угломерной и т.д.) и для любой технологии измерений (СШП радио, ультразвук и т.д.).

Насколько известно авторам, рассмотренная задача ставится и решается впервые. Обычно определение числа ОТ и их размещения при проектировании и развёртывании ЛНС решается «по наитию», методом проб и ошибок, что обычно приводит к избыточности инфраструктуры ЛНС и её удорожанию. Предложенный метод призван стать основой перспективного инструмента автоматизации проектирования ЛНС, который сократит срок проектирования и оптимизирует стоимость инфраструктуры ЛНС при заданном качестве координатных определений.

Предложенный метод подлежит дальнейшему развитию. Одно из направлений – повышение эффективности генетического алгоритма путём эмпирической модификации структуры и параметров генетического алгоритма, введения механизма адаптации или запрограммированного монотонного изменения параметров при приближении к экстремумам [5, 6]. Другое направление – учёт дополнительных характеристик элементов ЛНС, таких как ограниченность дальности радиолинии потребитель-ОТ, пространственное распределение наиболее вероятных мест нахождения потребителя («тепловых карт»), исключение запретных мест размещения ОТ и пр. Результаты метода без труда обобщаются на ЛНС для открытой местности с учётом естественных и искусственных препятствий на пути навигационных сигналов.

**Список использованных источников**

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционировани / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Радиотехника, 2010
2. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Монография / Под ред. А.И. Перова – М.: Радиотехника, 2020
3. Holland J.N. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, Michigan: Univ. of Michigan Press, 1975
4. Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning/ D. Goldberg. — Massachusetts: Addison-Wesley, 1989. — ISBN 0201157675
5. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы: Учебное пособие. Под ред. В.М. Курейчика. – Ростов-на-Дону: ООО «Ростиздат», 2004
6. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007
7. Обобщенный геометрический фактор в радионавигационных системах с использованием псевдоспутников / А. И. Перов, А. Ю. Устинов // Радиотехника. – 2015. – № 12. – С. 101-110.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613197 Российская Федерация. Программа для оценки геометрического фактора спутниковой радионавигационной системы с учетом локального функционального дополнения псевдоспутников : № 2016610533 : заявл. 27.01.2016 : опубл. 21.03.2016 / А. Ю. Устинов, А. И. Перов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».
9. Ash, Joshua N.; Moses, Randolph L. On optimal anchor node placement in sensor localization by optimization of subspace principal angles. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008.
10. Suwatthikul, Charuwalee; Chantaweesomboon, Witsarawat; Manatrinon, Supatra; Athikulwongse, Krit; Kaemarungsi, Kamol. Implication of Anchor Placement on Performance of UWB Real-Time Locating System. IEEE 8th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES) - Chonburi, Thailand, 2017
11. <https://www.sewio.net/the-dilution-of-precision-anchor-geometry/>, доступ 15 августа 2021 г.
12. Разработка приложения по определению геометрического фактора для локальных навигационных систем / С. В. Солдаткин, С. В. Черных, А. Е. Боев, Н. Н. Руковишников // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ ДВАДЦАТЬ СЕДЬМОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ, Москва, 11–12 марта 2021 года. – МОСКВА: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2021. – С. 79.