

## АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПСЕВДОСПУТНИКОВ МЕТОДОМ НЕЛДЕРА-МИДА

С.А. Якушенко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

С.О. Бурлаков<sup>2</sup>, д-р техн. наук, профессор

В.Е. Егрушев<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ст. преподаватель

С.С. Веркин<sup>2</sup>, канд. техн. наук, преподаватель

В.В. Антонов<sup>2</sup>, преподаватель

И.Ю. Франтенко<sup>2</sup>, адъюнкт

<sup>1</sup>Государственный университет аэрокосмического приборостроения

<sup>2</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного  
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2022-3-2-160-165

**Аннотация.** В статье рассматривается алгоритм улучшения показателей точности определения местоположения потребителя и доступности спутниковых навигационных систем в условиях городской застройки. Подход основан на использовании псевдоспутников. Особенностью работы является обоснование потребного количества псевдоспутников и их оптимальное размещение относительно маршрута передвижения потребителей в заданном районе.

**Ключевые слова:** спутниковая радионавигационная система, псевдоспутник, точность определения координат потребителя, доступность спутниковой навигационной системы, орбитальная группировка.

При проектировании систем мониторинга и диспетчеризации (СМД) транспортных средств (ТС) большое внимание уделяется вопросам непрерывного контроля за подвижными объектами и оперативного управления их передвижением. Другими словами, необходимо знать местоположение и траектории движения ТС, отображаемых на автоматизированном рабочем месте с требуемой степенью детализации, особенно при передвижении в сложных физико-географических условиях местности, где ограничиваются возможности точности и доступности спутниковых навигационных систем. Для повышения доступности спутниковой системы навигации в условиях городской застройки перспективным направлением является использование в системах позиционирования псевдоспутников (ПС) [1]. В статье представлен алгоритм оптимального раз-

мещения псевдоспутников, позволяющей повысить доступность спутниковой радионавигационной системы (СРНС) в условиях городской застройки.

### **Результаты исследования**

Известно, несколько работ [2, 3], посвященных оптимизации размещения псевдоспутников в целях уменьшения геометрического фактора при движении подвижного объекта.

В [2] представлен алгоритм размещения псевдоспутников для снижения геометрического фактора при движении объекта. В [3] рассматривается подход для размещения псевдоспутников воздушного судна. Данные работы можно рассматривать как основу для разработки алгоритма и методики размещения псевдоспутников в условиях города или сильно пересеченной местности (рис. 1).

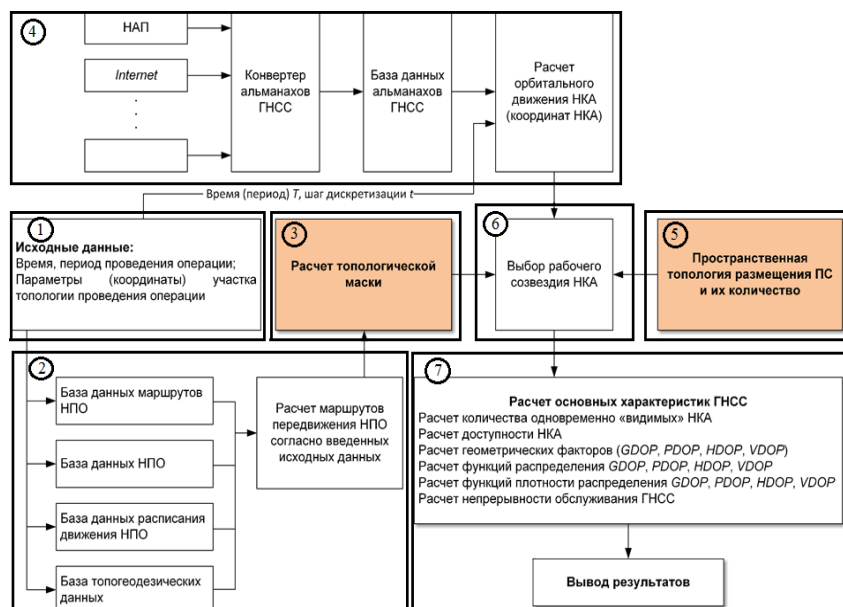


Рис. 1. Блок-схема расчета основных характеристик ГНСС ГЛОНАСС с учётом топологии городской застройки

На основе исходных данных времени, периода, топологии участка проведения операции (блок 1), расчетных данных движения ПО (блок 2) производится расчет топологической маски (блок 3). С использованием результатов расчета в блоке 3, базы данных альманаха (блок 4) и пространственной топологии псевдоспутников (блок 5) осуществляется выбор созвездия НКА (блок 6). На основе расчетных данных в (блоке 7) осуществляется вычисление основных характеристик.

Данная методика реализуется с учетом оптимального размещения псевдоспутников.

Рассмотрим задачу оптимизации размещения ПС относительно маршрута ПО при навигационных определениях по системе ГЛОНАСС в условиях изменения конфигурации орбитальной группировки (ОГ) в точке наблюдения. Цель оптимизации заключается в уменьшении ГФ в пространственной плоскости ( $PDOP$ ), поэтому в качестве критерия оптимизации выбирается минимальное значение  $PDOP$  в локальной геодезической системе координат [4].

Полагаем, что маршруты ПО на определенных участках городской застройки могут осуществляться с разных направлений. В этом случае ПС необходимо установить так, чтобы средний  $PDOP$  для различных

траекторий маршрута ПО (начинающихся от исходной точки маршрута и до конечной точки маршрута ПО) стал минимальным.

Средний  $PDOP$  рассчитывается для интервала времени 8 суток (интервал повторяемости траекторий орбитального движения ГЛОНАСС). Задача оптимизации решается с дискретностью 1 час в области, ограниченной размерами 1x1 км по широте и долготе, центр которой совпадает с центром маршрута ПО в определенной городской застройки.

Для нахождения оптимального размещения ПС используем методы Хука-Дживса и Нелдера-Мида [4]. Оба метода реализовываются при выборе начальной точки установки ПС в середине 1 маршрута ПО. Использование двух методов позволит оценить верность полученных результатов.

Метод деформируемого многогранника относится к методам оптимизации нулевого порядка. Сущность метода заключается в минимизации функции  $PDOP$  в  $n$ -мерном пространстве путем построения многогранника, содержащего  $(n + 1)$  вершину. Очевидно, что каждая вершина в условиях нашей задачи соответствует некоторому вектору с координатами  $\overline{x[0]} = |B_0, L_0, H_0|^T$ . В каждой из вершин

многогранника вычисляются значения целевой функции  $f(x) = PDOP$ , определяются максимальное  $\overline{x[h]}$ , минимальное  $\overline{x[l]}$  и среднее  $\overline{x[g]}$  значения целевой функции.

Далее рассчитываются координаты центра тяжести  $\overline{x[q]} = |B_q, L_q, H_q|^T$  многогранника. Затем проводится операция отражения (вершина  $\overline{x[e]}$ ) и растяжения (вершина  $\overline{x[r]}$ ) многогранника. Выбор операции зависит от выполнения условий:

$$PDOP(\overline{x[e]}) < PDOP(\overline{x[r]}) < PDOP(\overline{x[h]}) \quad (1)$$

$$PDOP(\overline{x[r]}) < PDOP(\overline{x[e]}) < PDOP(\overline{x[h]}) \quad (2)$$

При выполнении условия (1) вершина  $\overline{x[h]}$  заменяется на  $\overline{x[e]}$ . При невыполнении условий (1, 2) проводится операция сжатия. Если выполняется условие (3), то вершина  $\overline{x[h]}$  заменяется на  $\overline{x[c]}$ , если нет, проводится операция редукции. При операции редукции расстояние между вершинами уменьшается вдвое

$$PDOP(\overline{x[c]}) < PDOP(\overline{x[h]}) \quad (3)$$

В процессе выполнения операций отражения, растяжения, сжатия и редукции многогранник изменяет свои размеры, что и определило название метода [5].

Таким образом, алгоритм оптимизации размещения ПС методом Нелдера-Мида содержит следующие шаги:

1. Задаются координаты некоторой базовой точки и остальных трех вершин многогранника. Так как в методе используются четыре основные операции (растяжения, отражения, сжатия, редукции), то задаем для каждой операции свои весовые коэффициенты.

2. Вычисляем минимизируемую функцию PDOP в данных точках.

3. Выбираем точки, соответствующие наименьшему и наибольшему значению минимизируемой

$$(\overline{x[h]})(\overline{x[l]}, \overline{x[h]}) PDOP(\overline{x[l]}) PDOP(\overline{x[h]}).$$

4. Вычисляем центр тяжести многогранника за исключением худшей точки  $(\overline{x[q]}, PDOP(\overline{x[q]}))$

$$\overline{x[q]} = \frac{1}{n} \sum \overline{x[i]}.$$

5. Выполняем операцию отражения худшей точки через центр тяжести  $(\overline{x[r]}, PDOP(\overline{x[r]}))$

$$\overline{x[r]} = \overline{x[q]} + a(\overline{x[q]} - \overline{x[h]}),$$

где  $a > 0$  параметр отражения.

6. Если  $PDOP(\overline{x[r]}) < PDOP(\overline{x[l]})$ , то выполняется операция растяжения.

7. Находится точка растяжения и выполняется расчет функции  $(\overline{x[e]}, PDOP(\overline{x[e]}))$

$$\overline{x[e]} = \overline{x[q]} + g(\overline{x[r]} - \overline{x[q]}),$$

где  $g > 0$  - параметр растяжения, рекомендуемое значение  $g = 2...3$ .

8. если  $PDOP(\overline{x[e]}) < PDOP(\overline{x[l]})$  то необходимо заменить худшую координату  $\overline{x[h]}$  на  $\overline{x[e]}$  и возвращаемся на шаг 3.

9. Если  $PDOP(\overline{x[e]}) > PDOP(\overline{x[l]})$ , то заменяем точку  $\overline{x[h]}$  на  $\overline{x[r]}$ , заканчиваем итерацию и возвращаемся на шаг 3.

10. Если  $PDOP(\overline{x[h]}) > PDOP(\overline{x[r]})$ , то меняем обозначения  $\overline{x[r]}$ ,  $\overline{x[h]}$  (и соответствующие значения функции) местами и возвращаемся на шаг 3.

11. Если  $PDOP(\overline{x[r]}) > PDOP(\overline{x[h]})$ , то переходим к выполнению операций сжатия.

$$12. \text{ Находится точка } \overline{x[c]}:$$

$$\overline{x[c]} = \overline{x[q]} + b(\overline{x[h]} - \overline{x[c]}),$$

где  $b > 0$  параметр сжатия и в ней вычисляется  $PDOP(\overline{x[c]})$ .

13. Если,  $PDOP(\overline{x[c]}) < PDOP(\overline{x[h]})$  то заменяем точку  $\overline{x[h]}$  на  $\overline{x[c]}$  и переходим на шаг 3.

14. Если  $PDOP(\overline{x[c]}) > PDOP(\overline{x[h]})$ , то стороны многогранника нужно уменьшить вдвое, выполнив операцию редукции:

$$\overline{x[i]} = \overline{x[l]} + 0.5(\overline{x[i]} - \overline{x[l]}).$$

15. Последний шаг – выполняется проверка сходимости (достигнут ли наименьший шаг, при котором PDOP не изменяется).

Данная методика реализована в программном продукте для автоматизированной системы прогнозирования доступности навигационных спутников (АСПДНС).

АСПДНС предназначена для обеспечения информацией о доступности навигационных спутников (НС) GPS и ГЛОНАСС при предварительно известной тра-

ектории движения подвижного объекта с использованием данных альманаха, принятым многоканальным приемником СРНС GNSS (рисунок 2). АСПДНС должна рассчитывать в координатах «местоположение подвижного объекта - время»: геометрические факторы ( $GDOP$ ,  $PDOP$ ,  $HDOP$ ); прогнозируемую точность определения координат навигационной аппаратуры потребителя (НАП), доступность НС, углы видимости НС, время «восхода и захода» НС, прогнозировать сценарии внезапных отказов НС. В АСПДНС учитывается выбранный метод определения доступности НС. При этом в ее состав должны входить следующие функциональные элементы: программные функции обработки данных НС; интерфейс, который отражает информацию о доступности НС и доступности маршрута подвижных объектов в автоматическом и ручном режиме. Интерфейс содержит функции отображения углов видимости спутника (азимут, угол места) и фильтр для моделирования сценариев внезапных отказов (рис. 2).

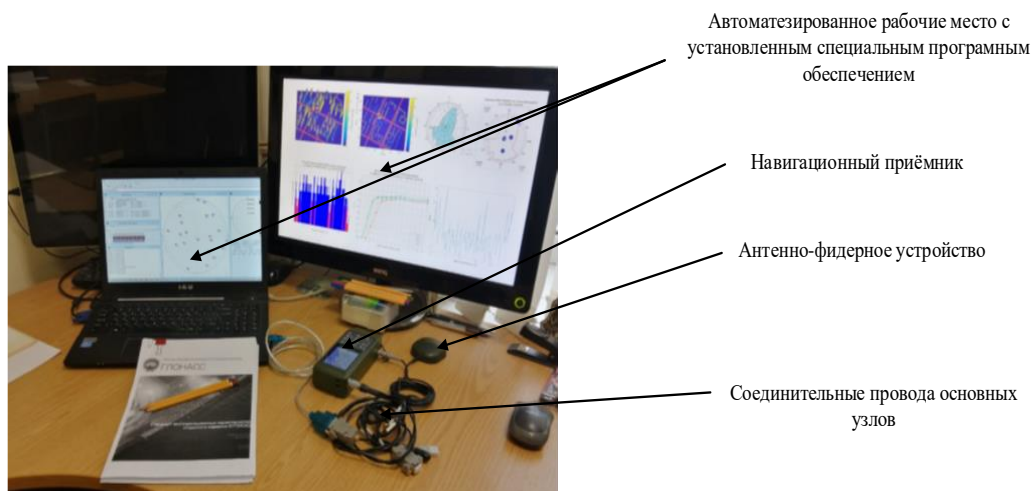


Рис. 2. Экспериментальная АСПДНС

Принцип действия АСПДНС состоит в следующем. До начала боевых действий в определённом участке городской застройки специалист по планированию вводит в АСПДНС информацию о маршруте спец подразделений (координаты, время) в необходимых точках (участках) маршрута. С навигационного приемника в АСПДНС вводятся данные альманаха, по которым

рассчитываются геометрические факторы для заданных координат и времени точек маршрута. Для характерных участков могут быть сформулированы сценарии исключения отдельных спутников из расчета. Это может быть обусловлено внезапными отказами спутников, вариациями положения подвижного объекта, воздействием помех с определенных известных

направлений или какими-либо другими факторами. Программные результаты расчета топологической маски позволяют учитывать местные источники затенения небесной сферы и моделировать маскирование наземных, воздушных или космических объектов топологией местности при решении различных задач. Топологическая маска будет использоваться при прогнози-

ровании числа видимых навигационных космических аппаратов для вычисления их доступности с учетом топологических особенностей местности, на основе модели доступности программа производит расчёт, который позволяет определить оптимальное размещение псевдоспутников.

Состав оборудования АСПДНС представлен на рисунке 3.

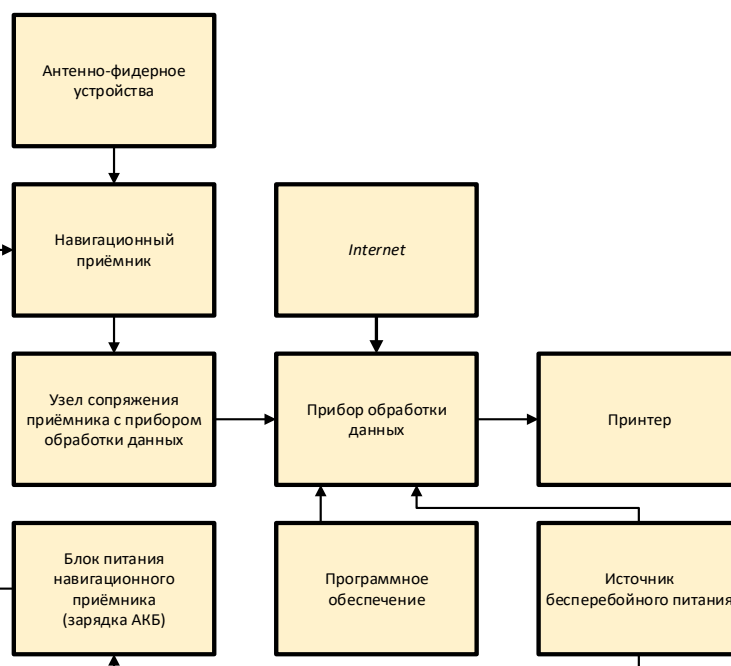


Рис. 3. Состав оборудования АСПДНС

**Заключение.** В статье представлен алгоритм для расчета основных характеристик спутниковой навигационной системы и размещения псевдоспутников с учетом городской застройки. Данное решение позволяет обеспечить наибольшую до-

ступность и точность определения местоположения потребителей глобальной навигационной спутниковой системы на маршрутах передвижения в заданном районе.

#### Библиографический список

1. Перов А.И. ГЛОНАСС модернизация и перспективы развития. Монография. – 2020. – С. 1028-1041.
2. Устинов А.Ю. Исследование навигационного приёмника, работающего по сигналам наземных псевдоспутников: магистерская диссертация / А.Ю. Устинов, Нац. исслед. ун-т "МЭИ", Кафедра радиотехнических систем (РТС). – М., 2013. – 89 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elib.mpei.ru/action.php>?
3. Арефьев Р.О. Методы повышения точности ГЛОНАСС в зоне аэродрома путём оптимизации размещения сети псевдоспутников // диссертация канд. техн. наук. – М., 2018. – 162 с.
4. Richard B. Langley. Dilution of Precision // GPS WORLD. May 1999. – P. 52-59.
5. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_2/2\\_1.php](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/2_1.php) свободный. (Дата обращения: 01.06.2017)

---

**ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE PLACEMENT OF PSEUDOSATELLITES BY THE NELDER-MEAD METHOD**

**S.A. Yakushenko**<sup>1</sup>, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

**S.O. Burlakov**<sup>2</sup>, *Doctor of Technical Sciences, Professor*

**V.E. Egrushev**<sup>2</sup>, *Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer*

**S.S. Verkin**<sup>2</sup>, *Candidate of Technical Sciences, Lecturer*

**V.V. Antonov**<sup>2</sup>, *Lecturer*

**I.Y. Frantenko**, *Adjunct*

<sup>1</sup>**State University of Aerospace Instrumentation**

<sup>2</sup>**Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union**

**S.M. Budyonny**

**(Russia, St. Petersburg)**

***Abstract.** The article discusses an algorithm for improving the accuracy of determining the location of the consumer and the availability of satellite navigation systems in urban conditions. The approach is based on the use of pseudo-satellites. A feature of the work is the justification of the required number of pseudo-satellites and their optimal placement relative to the route of movement of consumers in a given area.*

***Keywords:** satellite radio navigation system, pseudo-satellite, accuracy of determining the user's coordinates, availability of the satellite navigation system, orbital constellation.*