
ПРИБОРЫ НАВИГАЦИИ

NAVIGATIONAL INSTRUMENTS

УДК 629.7.058.43
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-61-69

ОЦЕНКА МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ И ВЫСОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А. А. ВЯТКИН*, Т. О. МЫСЛИВЦЕВ, С. В. НИКИФОРОВ, А. Н. САКУЛИН

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
**Vka.mil.ru*

Аннотация. Для совершенствования навигационного обеспечения потребителя в условиях ограниченной „видимости“ созвездия спутниковых радионавигационных систем предложен алгоритм оценки местоположения динамических объектов на основе метода численной оптимизации как при использовании разнородной вспомогательной информации, так и без нее. Алгоритм может служить в качестве резервного для повышения устойчивости навигационного обеспечения потребителя и позволяет оценить его местоположение с метровой и даже дециметровой точностью, а смещения шкалы времени объекта относительно системной шкалы — с точностью до десятков наносекунд.

Ключевые слова: *вспомогательная информация, навигационный космический аппарат, потребитель навигационной системы, точность местоположения, высокодинамический объект*

Ссылка для цитирования: *Вяткин А. А., Мысливцев Т. О., Никифоров С. В., Сакулин А. Н. Оценка местоположения динамического объекта в условиях плотной и высотной городской застройки с использованием вспомогательной информации // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 1. С. 61—69. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-61-69.*

ESTIMATION OF A DYNAMIC OBJECT LOCATION IN DENSE AND HIGH-RISE URBAN DEVELOPMENT USING AUXILIARY INFORMATION

A. A. Vyatkin*, T. O. Myslivtsev, S. V. Nikiforov, A. N. Sakulin

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
**Vka.mil.ru*

Abstract. To improve navigation support for a user in conditions of limited “visibility” of a satellite radio navigation system constellation, an algorithm for estimating a dynamic object location is proposed based on a numerical optimization method, both with and without the use of heterogeneous auxiliary information. The algorithm can serve as a backup to increase the user's navigation support stability and allows to estimate an object location with meter and even decimeter accuracy, and the object time scale displacement relative to the system scale - with an accuracy of tens of nanoseconds.

Keywords: *auxiliary information, navigation spacecraft, navigation system user, location accuracy, highly dynamic object*

For citation: *Vyatkin A. A., Myslivtsev T. O., Nikiforov S. V., Sakulin A. N. Estimation of a dynamic object location in dense and high-rise urban development using auxiliary information. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 1. P. 61—69 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-61-69.*

Введение. В настоящее время для оценки местоположения потребителя (динамического объекта) используется аппаратура спутниковых радионавигационных систем (СРНС). При решении широкого круга целевых задач потребитель должен использовать оборудование в автономном режиме, что может существенно снизить эффективность его применения вследствие различных факторов воздействия [1]. Одной из причин низкого уровня технической надежности аппаратуры является размещение на одной платформе, без возможности дублирования, минимально необходимого радиоэлектронного оборудования (систем навигации, связи, управления, электроснабжения и т.п.).

Приемная система таких потребителей имеет различный уровень сложности и учитывает для определения своего местоположения несколько сигналов, поступающих от датчиков различной физической природы. При этом точность позиционирования существенно зависит от динамических свойств объекта и информативности измерительной выборки.

В зависимости от сложности решаемых задач в составе оборудования, функционирующего в автономном режиме, могут быть размещены навигационные системы следующих типов [2, 3]:

- 1) на основе навигационной аппаратуры потребителя (НАП) СРНС;
- 2) на основе комплексирования сигналов микромеханической инерциальной навигационной системы (ИНС) и НАП СРНС;
- 3) на основе комплексирования данных нескольких навигационных устройств и др.

В основном для решения повседневных задач предусматривается использование систем навигации первого или второго типа, которые содержат НАП одной или нескольких СРНС: ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (Европа), Beidou (Китай) и др.

Навигационная система первого типа обеспечивает точность навигации 1—2,5 м как в горизонтальной плоскости, так и по высоте [2]. Для решения более сложных задач в состав оборудования входит навигационная система второго типа, где установлены элементы автономной навигации — барометры, гироскопы, высотомеры, акселерометры и т.д. На современном этапе развития технологий микромеханические ИНС без коррекции по сигналам навигационных космических аппаратов (НКА) способны поддерживать приемлемую точность определения пути на уровне 100 м не более 10 мин [4].

Местоположение НАП оценивается в результате обработки радиосигналов от созвездия „видимых“ НКА (четыре и более). Однако в условиях плотной и высотной городской застройки потребитель часто попадает в области ограниченной „видимости“ группировки аппаратов СРНС (один—три НКА). Используемые алгоритмы решения навигационной задачи на основе выборки одномоментных измерений либо массива данных нарастающего объема [5] не способны в данных условиях оценить вектор положения НАП. Это может привести к потере ориентации либо к аварийной ситуации для движущегося (высокодинамического) объекта с системой навигации первого типа практически немедленно и через несколько минут для системы навигации второго типа.

Для совершенствования навигационного обеспечения таких потребителей в условиях ограниченной „видимости“ созвездия НКА могут быть использованы стационарные (мобильные) имитаторы сигналов СРНС, электронные карты местности, ресурсы мобильных сетей и Wi-Fi точек доступа, а также подсветка в направлении движения. Однако такие решения труднореализуемы на неоснащенных участках местности и при плотной и высотной городской застройке.

Дополнительным способом повышения автономности и точности навигационной системы потребителя, местоположение которого определяется в виде вектора $[x \ y \ z \ t]^T$, является использование вспомогательной информации, поступающей от барометров, радио- или лазерных высотомеров [6]. Это оборудование, вес которого составляет десятки или сотни грамм, позволяет повысить точность определения координат за счет использования дополни-

тельных каналов поступления навигационных данных, что существенно повышает информативность измерительной выборки в условиях ограниченной „видимости“ НКА.

В настоящей статье предложен алгоритм решения навигационной задачи по оценке местоположения динамического объекта на основе метода численной оптимизации в условиях „видимости“ одного—трех НКА как при использовании разнородной вспомогательной информации, так и без нее.

Оценка местоположения динамического объекта в условиях радиовидимости одного—трех НКА. Возможность возникновения ситуации, когда здания и сооружения сокращают обсервацию до одного—трех НКА СРНС ГЛОНАСС для потребителя, рассмотрим на примере района многоэтажного жилого комплекса Санкт-Петербурга. Для отображения „видимых“ НКА и решения навигационной задачи используем НАП „Орион“ производства компании „Навис“ (Санкт-Петербург) [7].

Схема проведения эксперимента по оценке местоположения НАП „Орион“ представлена на рис. 1. Измерения осуществлялись 4 ноября 2022 г. с 16:20:00 до 17:00:00 UT во дворе („колодце“) 9-этажного дома в точке 1 и на крыше этого же здания в точке 2 (рис. 1).

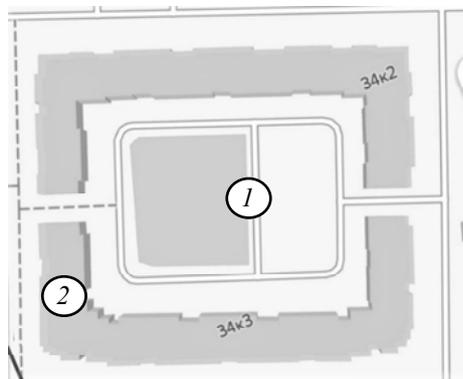


Рис. 1

При обновлении альманаха СРНС на мониторе НАП отображается расположение на небесной сфере НКА ГЛОНАСС и GPS, а также геостационарных космических аппаратов широкозонных дифференциальных систем SBAS (WAAS, EGNOS, СДКМ и др.) [5]. Произведем настройку НАП „Орион“ таким образом, чтобы решение навигационной задачи выполнялось только по измерениям, производимым НКА системы ГЛОНАСС.

Обсервация НКА СРНС ГЛОНАСС в точке 1 (см. рис. 1) представлена на рис. 2, а. На момент эксперимента в зоне „видимости“ НАП находилось три спутника ГЛОНАСС с номерами 3, 4 и 12. Как видно из рисунка, по трем НКА, имеющимся в аппаратуре, строгим алгоритмом навигационная задача не решается.

При оценке местоположения НАП в точке 2 (см. рис. 1) в обсервацию попадают уже 7 НКА ГЛОНАСС с номерами 3, 4, 5, 12, 14, 16 и 21 (рис. 2, б) и навигационная задача решается, причем геометрический фактор (PDOP) равен 1,8.

Приведенный пример показывает, что в условиях плотной и высотной городской застройки (даже в жилых комплексах с 9-этажными домами) возможны ситуации, когда в обсервацию НАП попадают не более трех НКА, что влечет за собой срыв выполнения навигационной задачи.

Обычно в условиях плотной и высотной городской застройки при „видимости“ одного—трех НКА потребитель во избежание аварии останавливается на месте до момента восстановления устойчивого навигационного поля. Такие действия (по заранее заложенной программе) предусмотрены для минимизации вероятности потери оборудования и полезной нагрузки динамического объекта.

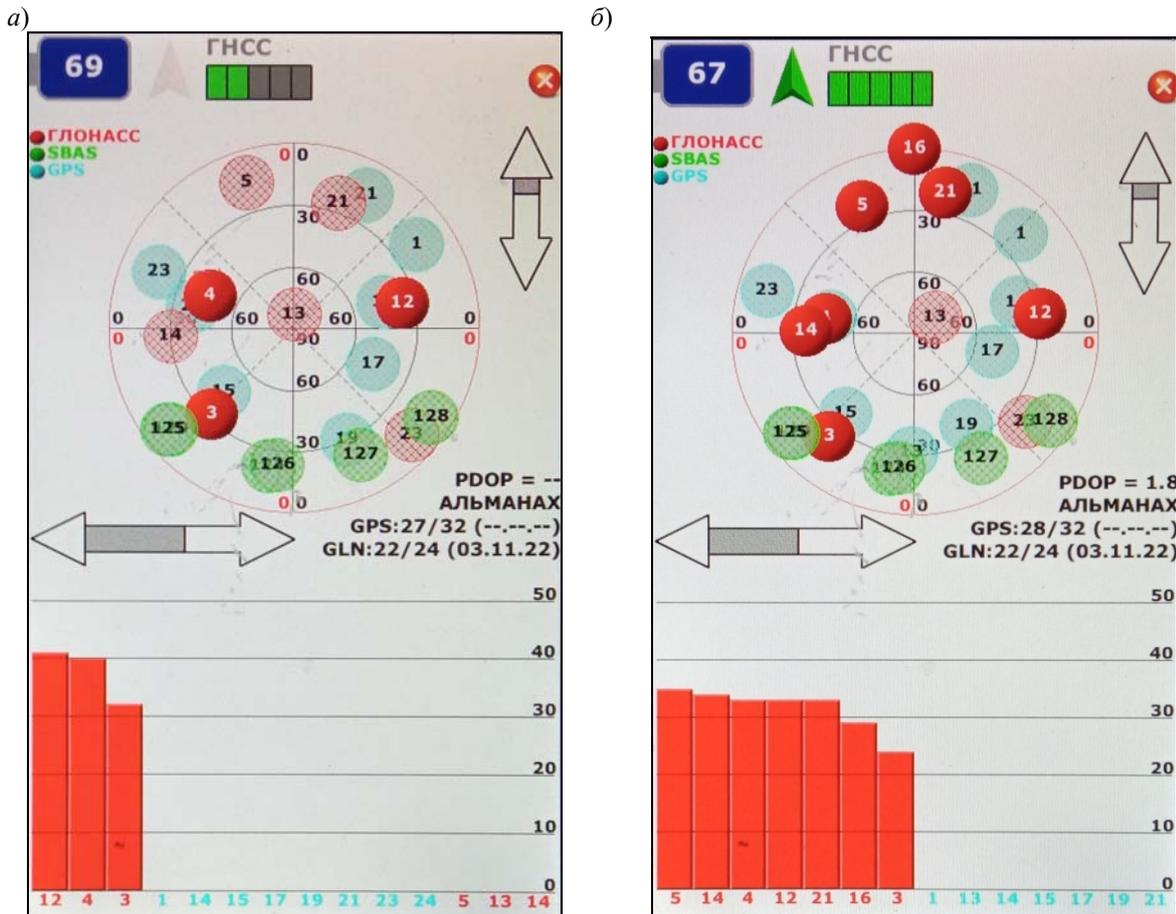


Рис. 2

Однако возможны ситуации, когда объекту требуется выполнить работы среди зданий и сооружений в условиях „видимости“ одного—трех НКА. В этом случае потеря данных о местоположении объекта или пауза до появления обсервации четырех и более НКА может привести к срыву выполнения целевой задачи. Такая ситуация может возникнуть, например, при работе автономного инспектора строительной-технической экспертизы высотных зданий и сооружений (далее — „инспектор“)[3].

Таким образом, требуется разработать алгоритмы, которые позволят оценить местоположение объекта на основе измерения текущих навигационных параметров НКА. Для повышения точности оценки местоположения необходимо предусмотреть использование вспомогательной информации, в качестве которой могут выступать измеряемая высота и (или) радиовидимость маяка с известными координатами. Оценка точности местоположения объекта должна производиться в течение 10 — 15 мин и составлять не более единиц метров.

Моделирование процесса решения навигационной задачи. Решением навигационной задачи является оценка местоположения объекта. Будем рассматривать навигацию неподвижного объекта, тогда оценивается вектор положения

$$\mathbf{P} = [xyzB]^T,$$

где x, y, z — координаты положения объекта в геоцентрической прямоугольной системе координат; B — уход шкалы времени объекта (ШВО) от системной шкалы.

При позиционировании неподвижного объекта достаточно измерить псевдодалность до „видимых“ НКА. Модель измерения псевдодалности можно представить в следующем виде [5]:

$$\tilde{D} = D_{\text{ист}}(t_{\text{пр}}^{\text{ШВО}}) + D' + \delta\tilde{D}, \quad (1)$$

где $D_{\text{ист}}(t_{\text{пр}}^{\text{ШВО}})$ — истинная геометрическая дальность между НКА и объектом; D' — погрешность определения истинной геометрической дальности, обусловленная сдвигом ШВО относительно шкалы НКА; $\delta\tilde{D}$ — составляющие погрешности определения псевдодальности, имеющие случайный характер.

Погрешность определения истинной геометрической дальности, обусловленную сдвигом шкал времени, представим следующим образом:

$$D' = c(B - b_n), \quad (2)$$

где c — скорость света, b_n — уход бортовой шкалы времени n -го НКА.

Измерение высоты от объекта до поверхности Земли осуществляется по формуле

$$\tilde{h} = h_{\text{ист}} + \delta\tilde{h}, \quad (3)$$

где $h_{\text{ист}}$ — истинная высота от поверхности Земли до объекта; $\delta\tilde{h}$ — составляющая погрешности определения высоты, имеющая случайный характер.

Предположим, что „инспектор“ вертолетного типа произвел обследование жилого комплекса с плотной и высотной застройкой, при этом в обсервации НАП оказываются только 3 „видимых“ спутника ГЛОНАСС (номера 3, 4 и 12, рис. 2, а). В этих условиях „инспектор“ фиксирует свое местоположение и определяет координаты по измерениям псевдодальностей до одного, двух или трех НКА с использованием данных высотомера или без них. Требуется оценить местоположение объекта для продолжения выполнения целевой задачи и принятия решения о дальнейших маневрах.

Для решения навигационной задачи в сложившейся обстановке предлагается метод численной оптимизации [8], суть которого заключается в том, что, имея результаты измерений псевдодальностей до „видимых“ НКА и обладая вспомогательной информацией в виде значения \tilde{h} в известные моменты времени, можно подобрать такое местоположение „инспектора“ (x, y, z) и такое значение B , которые будут соответствовать истинному значению вектора $\mathbf{\Pi} = [xyzB]^T$. В данном случае функционал $f(x, y, z, B)$ должен достигать минимального значения в точке, близкой к реальным координатам объекта, с учетом погрешностей наблюдений.

Расчетное значение псевдодальностей от n -го НКА (с координатами $X_n Y_n Z_n$) до объекта (с координатами x, y, z) в заданные моменты времени можно представить в виде

$$\tilde{D}_{pi} = \sqrt{(X_{ni} - x)^2 + (Y_{ni} - y)^2 + (Z_{ni} - z)^2} + D', \quad (4)$$

а расчетное значение высот от „инспектора“ (с координатами x, y, z) в заданные моменты времени до поверхности Земли (X_3, Y_3, Z_3) — в виде

$$\tilde{h}_{pi} = \sqrt{(X_{3i} - x)^2 + (Y_{3i} - y)^2 + (Z_{3i} - z)^2}. \quad (5)$$

Точка X_{3i}, Y_{3i}, Z_{3i} определяется как проекция местоположения „инспектора“ на поверхность Земли.

Функционал $f(x, y, z, B)$ определяется путем минимизации суммы квадратов невязок между рассчитанными значениями псевдодальностей \tilde{D}_p (4) и измеренными псевдодальностями \tilde{D} (1), а также невязок между рассчитанными высотами \tilde{h}_p (5) и измеренными \tilde{h} , где в качестве параметра оптимизации выступает вектор положения $\mathbf{\Pi} = [xyzB]^T$:

$$f(x, y, z, B) = \sum_{i=1}^N (\tilde{D}_{pi} - \tilde{D}_i)^2 + \sum_{i=1}^N (h_{pi} - \tilde{h}_i)^2, \quad (6)$$

где N — количество измерений.

Данный метод, кроме расчета вектора положения, позволяет вычислить уход ШВО от системной шкалы.

Минимизацию функционала $f(x, y, z, B)$ предлагается осуществлять методом Нелдера — Мида (метод деформируемого многогранника) [8], который достаточно эффективен при оптимизации нескольких переменных и не использует первые и вторые производные искомого функционала.

Структурная схема алгоритма оценки вектора положения „инспектора“ в условиях „видимости“ одного—трех НКА при использовании данных высотомера представлена на рис. 3 [9].

Отклонения измеренных значений псевдодальности \tilde{D} и высоты \tilde{h} отличаются от расчетных значений \tilde{D}_p и \tilde{h}_p соответствующими значениями случайных погрешностей.

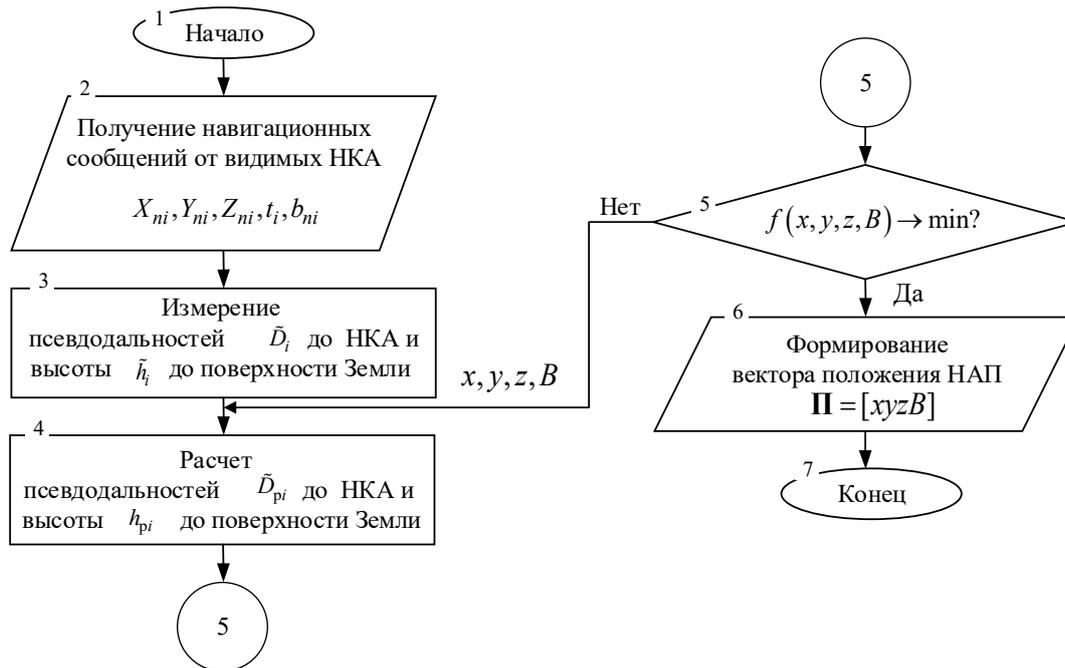


Рис. 3

Для моделирования измерений псевдодальностей согласно выражению (1) используются следующие параметры [10]:

— истинная дальность $D_{\text{ист}}(t_{\text{пр}}^{\text{ШВО}})$ до нескольких КА, рассчитанная с использованием координат „инспектора“ и эфемерид НКА ГЛОНАСС [<https://www.glonass-iac.ru/>];

— суммарная случайная величина определения псевдодальности $\delta\tilde{D}$ с гауссовским законом распределения, имеющая нулевое математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma_{\delta\tilde{D}}$ погрешностей оценки псевдодальностей, равное 6 м [5];

— максимальная разность хода часов на объекте и системной шкалы, равная 1 мкс [10].

Для моделирования измеренных значений высот с помощью барометрического высотомера согласно выражению (3) используются:

— истинная высота $h_{\text{ист}}$ от поверхности Земли до „инспектора“, рассчитанная с использованием координат объекта и модели земного эллипсоида в системе ПЗ-90;

— суммарная случайная величина определения высоты $\delta\tilde{h}$ с гауссовским законом распределения, имеющая нулевое МО и СКО погрешности оценки высоты $\sigma_{\delta\tilde{h}} = 0,1$ м (до высот 9 км) [6].

Оценка местоположения „инспектора“ с использованием предложенного алгоритма в условиях ограниченной „видимости“ группировки НКА ГЛОНАСС смоделирована для точки

с координатами [59°44'15 N; 30°28'15 E; $h=5$ м] на момент времени 16:20:00 UT 4 ноября 2022 г. Для расчета вектора положения „инспектора“ используются измерения (псевдодальностей до „видимых“ НКА и высоты до поверхности Земли) с периодичностью 1 с.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма оценим погрешность определения местоположения Δr между истинной и расчетной точкой нахождения „инспектора“:

$$\Delta r = \sqrt{(x_{\text{ист}} - x_p)^2 + (y_{\text{ист}} - y_p)^2 + (z_{\text{ист}} - z_p)^2}, \quad (7)$$

где $x_{\text{ист}}$, $y_{\text{ист}}$, $z_{\text{ист}}$ — истинные координаты „инспектора“, x_p , y_p , z_p — координаты „инспектора“, рассчитанные при поиске минимума функционала $f(x, y, z, B)$ в предложенном алгоритме.

Результаты моделирования. На рис. 4 представлены результаты оценки погрешности определения местоположения Δr „инспектора“ при использовании измерений, производимых только одним из „видимых“ НКА ГЛОНАСС (3, 4 или 12) в момент проведения эксперимента.

Результаты расчета получены как без учета вспомогательной информации (данные барометрического высотомера), на графике — это кривые, обозначенные как НКА № 3, НКА № 4 и НКА № 12, так и с использованием этих данных (кривые НКА № 3 + h , НКА № 4 + h и НКА № 12 + h). Анализ решения навигационной задачи по одному НКА показал, что предложенный алгоритм позволяет оценить местоположение „инспектора“ по данным любого из „видимых“ навигационных спутников СРНС практически с одинаковой точностью.

4 ноября 2022 г.

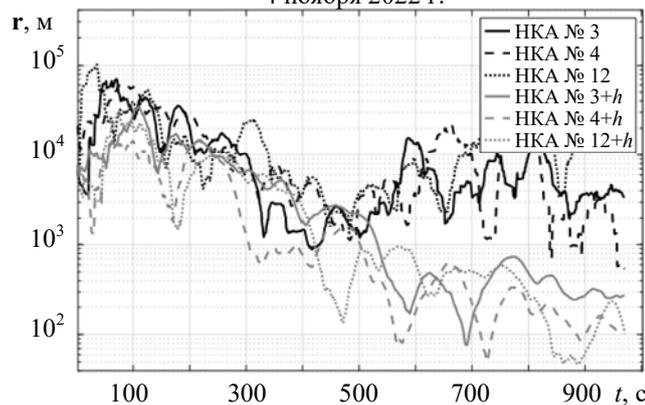


Рис. 4

На рис. 5 представлены результаты оценки погрешности определения местоположения Δr по измерениям, производимым одним НКА ГЛОНАСС (3) без использования вспомогательной информации (кривая НКА № 3) и с использованием таковой (кривая НКА № 3 + h); двумя НКА ГЛОНАСС (3 и 4) при таких же условиях (кривые НКА № 3, 4 и НКА № 3, 4 + h соответственно); тремя НКА ГЛОНАСС (3, 4 и 12) при тех же условиях (кривые НКА № 3, 4, 12 и НКА № 3, 4, 12 + h соответственно), а также четырьмя НКА ГЛОНАСС (3, 4, 12 и 21) с использованием вспомогательной информации (кривая НКА № 3, 4, 12, 21).

4 ноября 2022 г.

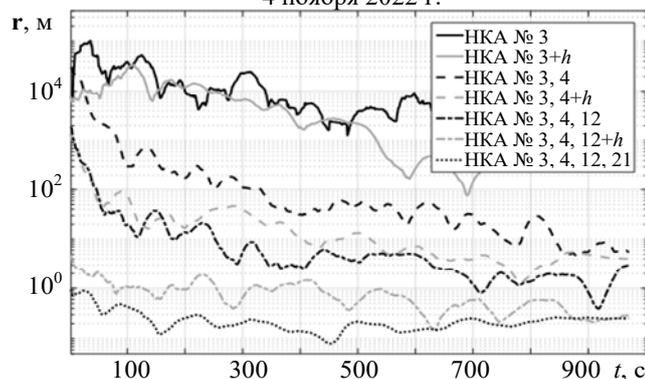


Рис. 5

Как показывает анализ результатов моделирования, использование предложенного алгоритма позволяет сделать следующие выводы:

1) оценки местоположения объекта с метровой точностью и ухода его шкалы времени относительно системной шкалы с точностью десятков наносекунд возможны в течение 10—15 мин при „видимости“ двух НКА с учетом вспомогательной информации или при „видимости“ трех НКА без учета таковой;

2) оценки местоположения объекта с дециметровой точностью и ухода его шкалы времени относительно системной шкалы с точностью десятков наносекунд, которая обеспечивается известными алгоритмами при „видимости“ четырех и более НКА, возможны в течение 1—2 мин при „видимости“ трех НКА с учетом вспомогательной информации;

3) повышение точности оценки местоположения объекта возможно с увеличением количества источников вспомогательной информации.

Заключение. Предложен алгоритм оценки местоположения динамического объекта на основе метода численной оптимизации в условиях „видимости“ одного—трех НКА, позволяющий использовать разнородную вспомогательную информацию (данные барометра, радио- или лазерного высотомера) и оценить местоположение потребителя с метровой и даже дециметровой точностью, а смещения его шкалы времени относительно системной шкалы — с точностью до десятков наносекунд.

Разработанный алгоритм позволяет повысить эффективность, точность и безопасность работ, которые осуществляет потребитель в условиях плотной и высотной городской застройки. Кроме того, данный алгоритм может использоваться в качестве резервного для повышения устойчивости навигационного обеспечения высокодинамических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники — новая проблема для ПВО // Отвага 2015. № 6 (14) [Электронный ресурс]: <<http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-besplotniki/>>, 11.12.2022.
2. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: Монография: СПб: Научные технологии, 2020. 204 с.
3. Алешин Б. С., Суханов В. Л., Шibaев В. М., Шнырев А. Г. Типы беспилотных летательных аппаратов // Межотраслевой альманах. 2014. № 46 [Электронный ресурс]: <<http://slaviza.ru/print:page,1,1494-tipy-besplotnyh-letatelnyh.html>>, 11.12.2022.
4. Семенова Л. Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. 2018. № 4 (27). С. 6—8.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
6. Гэн К., Чулин Н. А. Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей // Машиностроение и компьютерные технологии. 2016. № 12. С. 182—206.
7. ТДЦК 461513.104ТУ. Навигационная аппаратура потребителей глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS для индивидуального пользования „Орион“. 2019.
8. Аттетов А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С. Методы оптимизации. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 439 с.
9. Мысливцев Т. О., Никифоров С. В. Оценка точности координатно-временных определений потребителей в условиях ограниченной видимости КА глобальных навигационных спутниковых систем // Вопр. оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1—2 (151—152). С. 26—32.
10. Бюл. В17/2020. Эталонные сигналы частоты и времени. Характеристики и программы передач через радиостанции, наземные и космические средства навигации, сети телевизионного вещания и глобальную сеть интернет / Межведомственная комиссия по времени и эталонным частотам. Главный метрологический центр ГСВЧ. М.: Изд-во ВНИИФТРИ, 2020. 32 с.

Сведения об авторах

- Александр Михайлович Вяткин** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра передающих, антенно-фидерных устройств и средств системы единого времени; E-mail: Vka.mil.ru
- Тимофей Олегович Мысливцев** — д-р техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра передающих, антенно-фидерных устройств и средств системы единого времени; профессор; E-mail: Vka.mil.ru
- Сергей Валерьевич Никифоров** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра передающих, антенно-фидерных устройств и средств системы единого времени; E-mail: Vka.mil.ru
- Александр Николаевич Сакулин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра передающих, антенно-фидерных устройств и средств системы единого времени; E-mail: Vka.mil.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 14.11.2023.

REFERENCES

1. <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpkarmiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespiilotniki/>. (in Russ.)
2. Makarenko S.I. *Protivodeystviye bespiilotnym letatel'nyim apparatam* (Countering Unmanned Aerial Vehicles), St. Petersburg, 2020, 204 p. (in Russ.)
3. Aleshin B.S., Sukhanov V.L., Shibayev V.M., Shnyrev A.G. *Mezhotraslevoy al'manakh*, 2014, no. 46, [hUp://slaviza.ru/print:page,1,1494-tipy-bespiilotnyh-letatelnyh.html](http://slaviza.ru/print:page,1,1494-tipy-bespiilotnyh-letatelnyh.html). (in Russ.)
4. Semenova L.L. *Nauka i obrazovaniye segodnya*, 2018, no. 4(27), pp. 6–8. (in Russ.)
5. Perov A.I., Kharisov V.N., ed., *GLONASS. Printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of Construction and Operation), Moscow, 2010, 800 p. (in Russ.)
6. Gen K., Chulin N.A. *Mashinostroyeniye i komp'yuternyye tekhnologii*, 2016, no. 12, pp. 182–206. (in Russ.)
7. *Navigatsionnaya apparatura potrebiteley global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem GLONASS i GPS dlya individual'nogo pol'zovaniya "Orion" (indeks 14TS8009). Tekhnicheskiye usloviya. TDTSK.461513.104TU* (Navigation Equipment for Consumers of the Global Navigation Satellite Systems GLONASS and GPS for Individual Use "Orion" (index 14TS8009). Technical Conditions. TDTSK.461513.104TU). (in Russ.)
8. Attetov A.V., Galkin V.S., Zarubin S.V. *Metody optimizatsii* (Optimization Methods), Moscow, 2001, 439 p. (in Russ.)
9. Myslivtsev T.O., Nikiforov S.V. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu*, 2021, no. 1-2(151-152), pp. 26–32. (in Russ.)
10. *Byulleten' V17/2020. Etalonnyye signaly chastoty i vremeni. Kharakteristiki i programmy peredach cherez radiosstantsii, nazemnyye i kosmicheskiye sredstva navigatsii, seti televizionnogo veshchaniya i global'nyuyu set' internet* (Bulletin B17/2020. Frequency and Time Reference Signals. Characteristics and Programs of Transmissions Through Radio Stations, Ground and Space Navigation Aids, Television Broadcasting Networks and the Global Internet), Moscow, 2020, 32 p. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander A. Vyatkin** — Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmitting, Antenna-Feeder Devices and Unified Time System Facilities; E-mail: Vka.mil.ru
- Timofey O. Myslivtsev** — Dr. Sci., Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmitting, Antenna-Feeder Devices and Unified Time System Facilities; Professor; E-mail: Vka.mil.ru
- Sergey V. Nikiforov** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmitting, Antenna-Feeder Devices and Unified Time System Facilities; E-mail: Vka.mil.ru
- Alexander N. Sakulin** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmitting, Antenna-Feeder Devices and Unified Time System Facilities; E-mail: Vka.mil.ru

Received 30.05.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 14.11.2023.