

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОВЫХ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ И 3D КАРТЫ МЕСТНОСТИ

А.И. ДОХОВ, А.М. ЛУКЬЯНОВ, М.Н. ГАЛЕВИЧ, Е.В. ГРИНЧЕНКО, О.А. ЛУКЬЯНОВА

Предлагается метод повышения точности определения координат подвижного объекта в реальном масштабе времени. Приведены алгоритм и формулы решения навигационной задачи с подстановкой дополнительного уравнения поверхности местоположения.

Ключевые слова: спутниковая навигация, навигационная задача, 3D карта, поверхность местоположения.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в транспортном комплексе все большее применение находят средства спутниковой навигации. На ширину спектра задач, которые решают эти средства, существенное влияние оказывает точность определения координат подвижного объекта. На практике установлено, что точность координатных определений зависит от условий местности, где находится подвижной объект. Так, в условиях гористой местности и городских высоких строений навигационный приёмник, как правило, наблюдает меньшее количество спутников, чем в условиях открытой местности, что приводит к снижению точности координатных определений.

В настоящей работе предлагается подход к повышению точности определения координат автомобиля с использованием кодовых ГНСС-измерений. Повышение точности достигается путём добавления в навигационную задачу дополнительной информации из 3D карты местности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Условия задачи — автомобиль или какое-либо другое транспортное средство, которое оборудовано аппаратурой ГНСС-наблюдений и движется сугубо по земной поверхности и структурным элементам дорожно-транспортной инфраструктуры (мосты, туннели, многоуровневые дорожные развязки и др.). Задача — необходимо определить координаты автомобиля в любой момент времени при помощи кодовых ГНСС-измерений с привлечением дополнительной информации из 3D карты местности.

ПРОБЛЕМЫ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

В спутниковой навигации координаты приёмника определяются путём анализа и обработки данных измеренных псевдодальностей между приёмником и навигационными спутниками [1],[2]. Расстояние между местоположением спутника s и местоположением приёмника u определяется:

$$\rho = \|s - u\| + c\Delta t, \quad (1)$$

где Δt — разность шкалы времени часов приёмника и системного времени GPS, c — скорость

света. В каждое мгновение времени приёмник наблюдает одновременно некоторое количество спутников, поэтому формулу (1) можно представить в виде системы уравнений:

$$\rho_j = \sqrt{(x_j - x_u)^2 + (y_j - y_u)^2 + (z_j - z_u)^2} + c\Delta t_u, \quad (2) \\ j = 1 \dots N$$

где N — количество спутников, которые участвуют в решении задачи, (x_j, y_j, z_j) — координаты спутника, (x_u, y_u, z_u) — координаты приёмника. Таким образом, система уравнений имеет четыре неизвестных: координаты приёмника (x_u, y_u, z_u) и Δt_u , поэтому для решения задачи и получения трёх координат приёмника необходимо иметь одновременные навигационные измерения как минимум для четырёх спутников. Однако в условиях гористой местности или городских высотных строений достаточно часто проблематично одновременно наблюдать 4 навигационных спутника. А если в этих условиях и удаётся наблюдать необходимое количество спутников, то часто возникает проблема с их геометрическим расположением (высокая концентрация их расположения в некоторой небольшой области небесной полусферы), что приводит к существенным ошибкам в определении местоположения. Пути решения этой проблемы заключаются в привлечении дополнительной информации, которая может предоставляться различными инерционными приборами или, как предлагается в данной статье, привлекаться из географических карт местности.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ 3D КАРТЫ

3D карта содержит информацию о трёх пространственных координатах, что позволяет построить функцию поверхности, на которой находится транспортное средство, и использовать её как поверхность местоположения в решении навигационной задачи. Уравнение поверхности строится путём интерполяции координат местности, взятых из соответствующей информации матрицы высот 3D карты. Необходимая область местности устанавливается по предварительно определённому приближительному

местоположению транспортного средства, таким образом определение координат автомобиля выполняется в два этапа: сперва определяется приблизительное местоположение транспортного средства, а на втором этапе к системе уравнений (2) добавляется еще уравнение поверхности рельефа местности, где прогнозируемо должен быть автомобиль.

На первом этапе, если это первый момент определения координат транспортного средства, и в моменты, которые являются первыми после продолжительного перерыва навигационных наблюдений, который может быть вызван помехами окружающей среды (строения, густая высокая растительность, активные радиопомехи и др.), приблизительные координаты местоположения вычисляются с использованием кодовых ГНСС-измерений без дополнительных условий (выполняется решение системы уравнений (2), при условии наблюдения 4-х или больше навигационных спутников). В остальные моменты времени на первом этапе приблизительные координаты устанавливаются равными координатам, полученным в предшествующий момент времени.

На втором этапе привлекаем информацию о рельефе местности приблизительного местоположения транспортного средства (x_u, y_u, z_u) . Определяется прогнозируемая область F местоположения автомобиля в текущий момент времени:

$$F = D[(x_u, y_u, z_u)], \quad (3)$$

где $D[\vec{x}]$ — оператор определения прогнозированной области местоположения в точке \vec{x} . Оператор $D[\vec{x}]$ зависит от типа представления информации 3D карты и может отличаться для каждого типа карты, используемой для решения навигационной задачи. Схематично оператор $D[\vec{x}]$ представляет собой операцию по определению необходимого количества точек, которые лежат в области F и необходимы для интерполяции функции поверхности движения транспортного средства.

Далее, путем интерполяции точек 3D карты, лежащих в области F , строится поверхность прогнозируемого местоположения $f(x, y, z)$.

После построения прогнозируемой поверхности добавляем ее уравнение в систему уравнений (2) и находим уточненные координаты местоположения транспортного средства, решив следующую систему уравнений (4):

$$\begin{cases} \rho_j = \sqrt{(x_j - x_u)^2 + (y_j - y_u)^2 + (z_j - z_u)^2} + c\Delta t_u, \\ j = 1 \dots N, N \geq 4 \\ f(x_u, y_u, z_u) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы уравнений (4) осуществляется по обычному алгоритму решения навигационной задачи — методом наименьших квадратов, при этом матрица направляющих косинусов H имеет следующий вид:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{x_{k-1} - x^1}{r_1} & \frac{y_{k-1} - y^1}{r_1} & \frac{z_{k-1} - z^1}{r_1} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{x_{k-1} - x^N}{r_N} & \frac{y_{k-1} - y^N}{r_N} & \frac{z_{k-1} - z^N}{r_N} & 1 \\ \frac{\partial f(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})}{\partial x} & \frac{\partial f(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})}{\partial y} & \frac{\partial f(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})}{\partial z} & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$r_i = \sqrt{(x_{k-1} - x^i)^2 + (y_{k-1} - y^i)^2 + (z_{k-1} - z^i)^2},$$

где $(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})$ — решение на итерации $k-1$ ((x_0, y_0, z_0) — опорные приближенные координаты), (x^i, y^i, z^i) — координаты i -го навигационного спутника. Корреляционная матрица $[N+1, N+1]$ шумов навигационных измерений W содержит дисперсии ошибок измерений псевдодальностей $\sigma_{\rho_i}^2$ и ошибку определения поверхности движения σ_h^2 , и в случае, если ошибки навигационных измерений не имеют корреляции между собою, имеет следующий вид:

$$W = \begin{pmatrix} \sigma_{\rho_i}^2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\rho_N}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_h^2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

При определении скорости также используется дополнительная информация. Из предположения о том, что транспортное средство движется строго по земной поверхности, вытекает, что вектор скорости лежит в плоскости, касательной к поверхности движения в точке нахождения транспортного средства (x_0, y_0, z_0) . Дополнительное уравнение в таком случае будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial f(x_0, y_0, z_0)}{\partial x} * V_x + \frac{\partial f(x_0, y_0, z_0)}{\partial y} * V_y + \frac{\partial f(x_0, y_0, z_0)}{\partial z} * V_z = 0. \quad (7)$$

Точность определения координат

Характеристикой точности определения координат транспортного средства является ковариационная матрица K ошибок Δx [3]:

$$K = E[\Delta x * \Delta x^T] = (H^T W^{-1} H)^{-1}. \quad (8)$$

Для расчёта точности определения координат транспортного средства необходимо задать модель ошибок навигационных определений — сформировать матрицу W .

Из анализа существующих 3D карт установлено, что средняя квадратичная ошибка определения координат 3D карты равна 10 см. Известно, что точность навигационных спутниковых измерений значительно зависит от угла места El_i навигационного спутника. Для решения задачи реального времени достаточно часто используют обратно пропорциональную квадратичную

модель, которая характеризуется следующим типом значения дисперсии ошибки измерения [3]:

$$\sigma_{p_i}(El_i) = \sigma_z^2 \left(\frac{1}{\sin El_i} \right)^2, \quad (9)$$

где σ_z^2 – значение дисперсии шума измерений для зенитного спутника ($El = \pi/2$).

Так, в случае, если ошибки измерений псевдодальностей не имеют корреляции между собой, равнозначны, и зенитная квадратичная ошибка σ_z равна 5 метрам, а ошибка определения координат поверхности составляет 0.1 метра, то матрица W будет иметь следующий вид:

$$W = \begin{pmatrix} \left(\frac{5}{\sin El_1} \right)^2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{5}{\sin El_N} \right)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для оценки точности определения координат и их ошибки был проведен эксперимент со стационарным объектом, координаты которого известны. На рис. 1–10 изображены результаты эксперимента. Для определения влияния дополнительного условия на точность решения навигационная задача решалась в двух вариантах: первый — без дополнительных условий, второй — решение с дополнительным условием нахождения статического объекта на известной высоте. Также навигационная задача решалась с использованием различных созвездий навигационных спутников: первое созвездие — спутники с углом места не менее 10 градусов, второе созвездие — спутники с углом места не менее 30 градусов. Использование этих созвездий спутников позволяет промоделировать нахождение транспортного средства в различной местности: в местности за пределами крупных городов (угол места не менее 10 градусов) и между высокими строениями (угол места не менее 30 градусов). Количество спутников в каждом созвездии в каждый момент времени приведено на рис. 1 и 2.

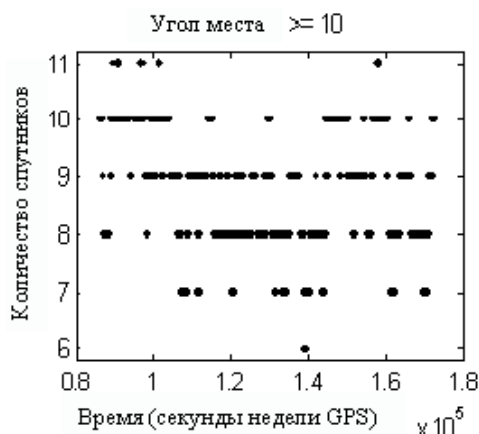


Рис. 1. Количество спутников GPS, использованных в решении навигационной задачи

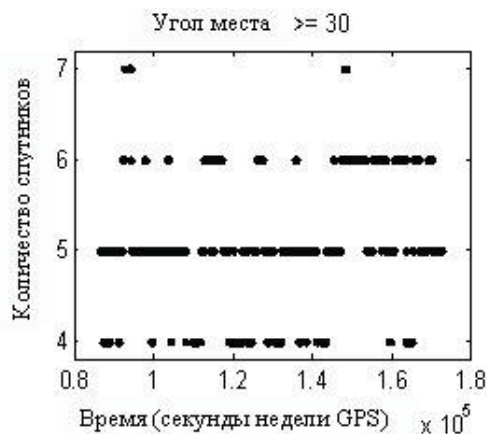


Рис. 2. Количество спутников GPS, использованных в решении навигационной задачи

На рис. 3 и 4 изображены точности (2σ) определения горизонтальной составляющей Юг — Север. Значение точности определено по формуле (8). На рисунках видно, что точность определения составляющей Юг — Север в задаче с дополнительным условием выше точности задачи без дополнительного условия, что отображается в уменьшении ошибки определения горизонтальной составляющей Юг — Север в задаче с добавлением дополнительного условия.

На рис. 5 и 6 изображены точности (2σ) определения горизонтальной составляющей Запад — Восток. Из рисунков видно, что точность определения составляющей Запад — Восток в задаче с дополнительным условием почти совпадает с точностью задачи без дополнительного условия, что отображается в совпадении ошибки определения горизонтальной составляющей Запад — Восток в задаче с добавлением дополнительного условия. Из рисунка 6 видно, что в задаче с созвездием спутников, угол места которых не менее 30 градусов, в некоторые интервалы времени точность задачи с дополнительным условием выше точности задачи без дополнительного условия, что отображается, как это видно из рисунка 8, в уменьшении ошибки определения горизонтальной составляющей Запад — Восток.

На рис. 7 и 8 изображено отклонение горизонтальных составляющих местоположения в системе координат (восток, север). Из рисунка видно, что использование дополнительного условия в 2.5 раза уменьшает ошибку определения координат по оси Юг — Север, в то время как по оси Запад — Восток абсолютная ошибка определения координат существенно не изменяется. Отклонение вертикальной составляющей в задаче с дополнительным условием равно ошибке определения высоты в карте местности.

На рис. 9 и 10 изображена ошибка определения горизонтальной составляющей скорости. Из этих рисунков видно, что добавление дополнительного условия приблизительно в 1.5–2 раза уменьшает ошибку определения горизонтальной составляющей скорости объекта при использовании созвездия спутников с углом места не менее 10 градусов, а в случае использования созвездия



Рис. 3. Точность определения горизонтальной составляющей Юг – Север:
 — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием



Рис. 4. Точность определения горизонтальной составляющей Юг – Север:
 — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием



Рис. 5. Точность определения горизонтальной составляющей Запад – Восток:
 — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием

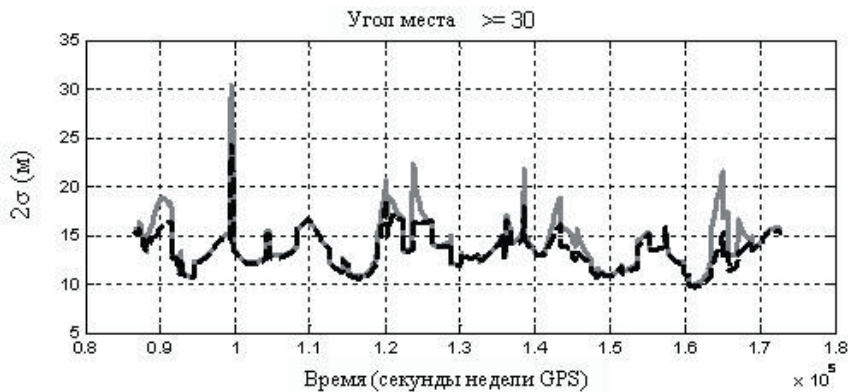


Рис. 6. Точность определения горизонтальной составляющей Запад – Восток:
 — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием

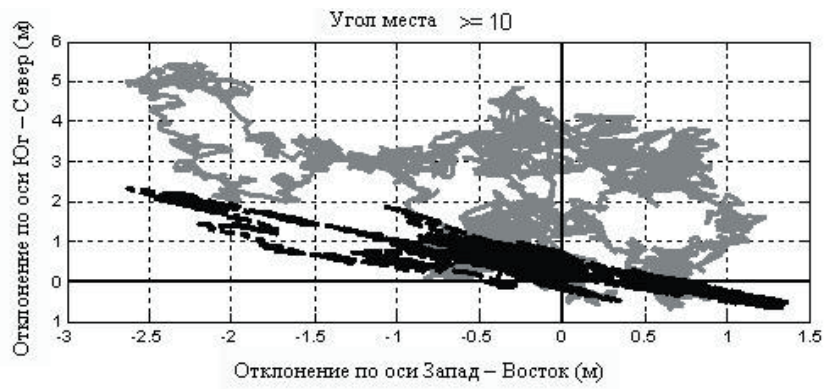


Рис. 7. Отклонение горизонтальных составляющих местоположения: — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием

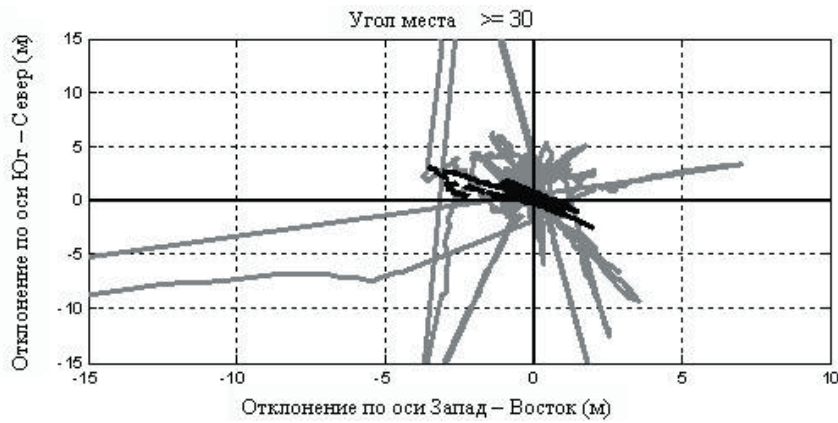


Рис. 8. Отклонение горизонтальных составляющих местоположения: — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием

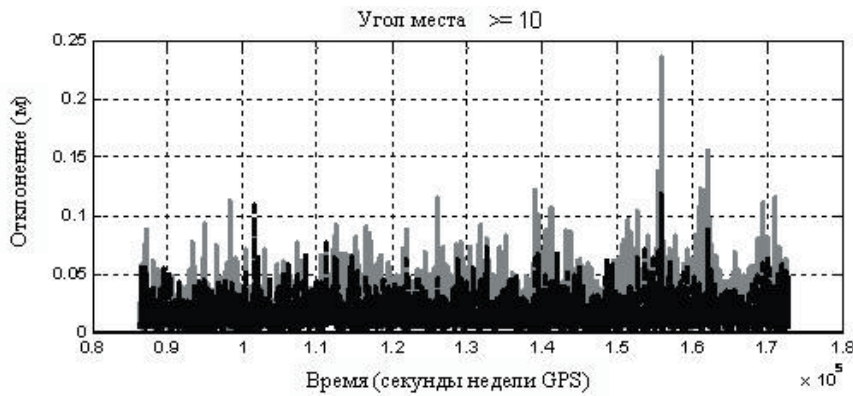


Рис. 9. Отклонение горизонтальной составляющей скорости: — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием

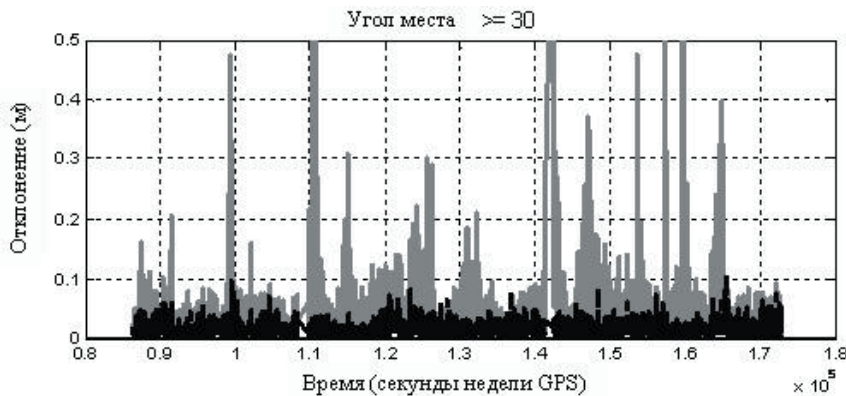


Рис. 10. Отклонение горизонтальной составляющей скорости: — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием

спутников с углом места не менее 30 градусов эта ошибка уменьшается в 2–3 раза.

Также в ходе эксперимента было проверено, что добавление дополнительного условия в виде уравнения поверхности местоположения улучшает значение геометрического фактора и позволяет для определения трех пространственных координат объекта использовать лишь три навигационных спутника вместо четырех. Для этого при решении навигационной задачи использовалось созвездие спутников с углом места не менее 40 градусов, количество спутников в созвездии изображено на рис. 11. В случаях, когда в созвездии спутников было более 3 спутников, навигационная задача решалась в двух вариантах: первый — без дополнительных условий, второй — решение с дополнительным условием нахождения стационарного объекта на известной высоте. В случаях, когда в созвездии спутников было только три спутника, навигационная задача решалась лишь с добавлением дополнительного условия нахождения статического объекта на известной высоте.

На рис. 12 и 13 изображено отклонение горизонтальных составляющих местоположения. Большое значение отклонения на этих рисунках достаточно существенно коррелирует со значением горизонтального геометрического фактора HDOP, которое изображено на рис. 14. Во время эксперимента созвездие навигационных спутников с углом места не менее 40 градусов и в котором находилось 3 спутника имело место в 37.8% моментах расчёта

координат, среди них ошибка горизонтальной составляющей местоположения в 50% случаев была меньше 1.01 м, в 95% случаев была меньше 9.26 м, а в 99% случаев — меньше 75.24 м.

Таким образом, добавление дополнительного условия в навигационную задачу позволяет улучшить геометрический фактор и находить решение при наблюдении лишь трех навигационных спутников вместо необходимых четырех, что способствует применению навигационного спутникового оборудования в местности с высокими строениями. Во время эксперимента введение дополнительного условия уменьшило ошибку горизонтальной составляющей на 50–65%, а ошибка определения вертикальной составляющей равнялась ошибке определения рельефа местности. При этом горизонтальный геометрический фактор, в случае использования созвездия спутников с углом места не менее 40 градусов, в среднем уменьшился в 2.36 раза.

Литература

- [1] Understanding GPS: principles and applications/ [editors], Elliott Kaplan, Christopher Hegarty.—2nd ed.- 723 pages.
- [2] Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б.Гофманн-Велленгоф, Г.Ліхтенеггер, Д. Коллінз; Пер. з англ. третього вид. під ред. Я.С.Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1995. — 380 с.
- [3] Ю.А. Соловьев. Системы спутниковой навигации. — М.: Эко-Трендз, 2000.

Поступила в редколлегию 27.08.2012

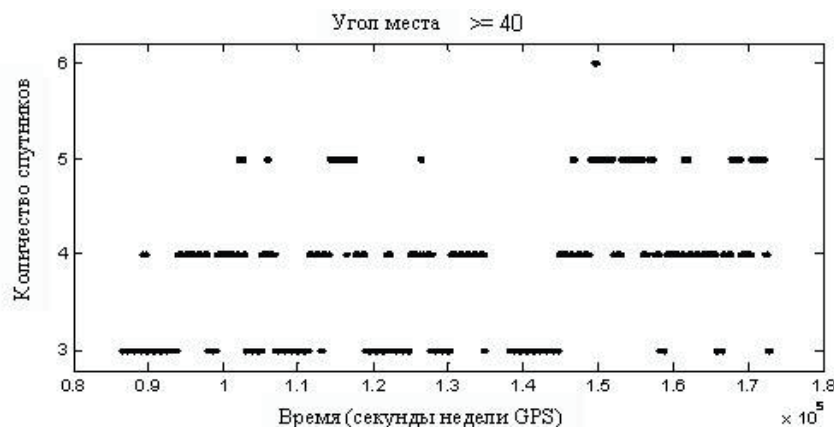


Рис. 11. Количество спутников GPS, задействованных в решении навигационной задачи

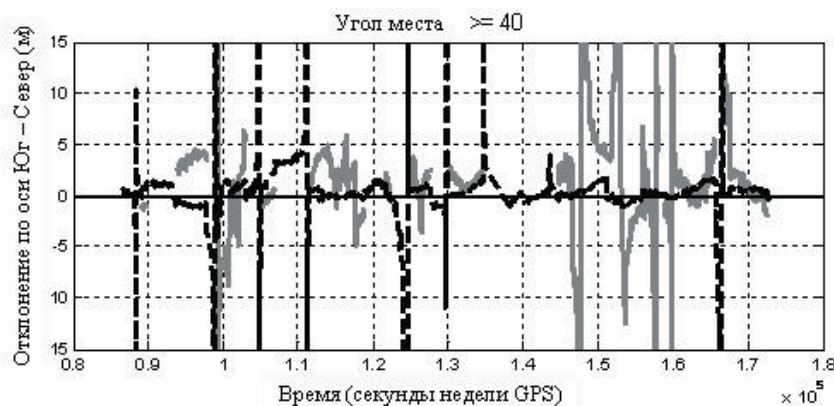


Рис. 12. Отклонение горизонтальной составляющей местоположения по оси Юг — Север:
— задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием

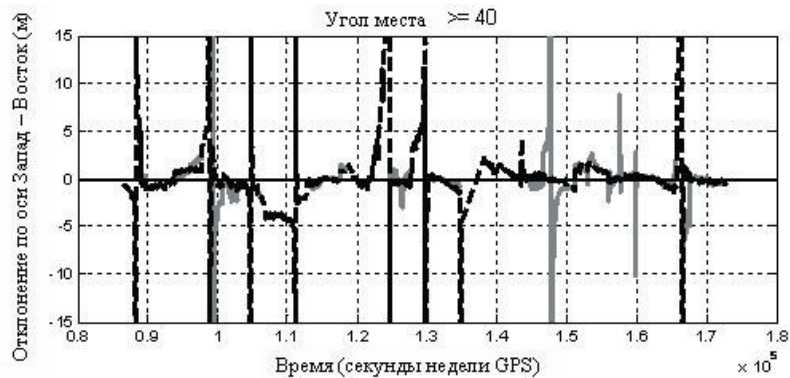


Рис. 13. Отклонение горизонтальной составляющей местоположения по оси Запад — Восток: — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием

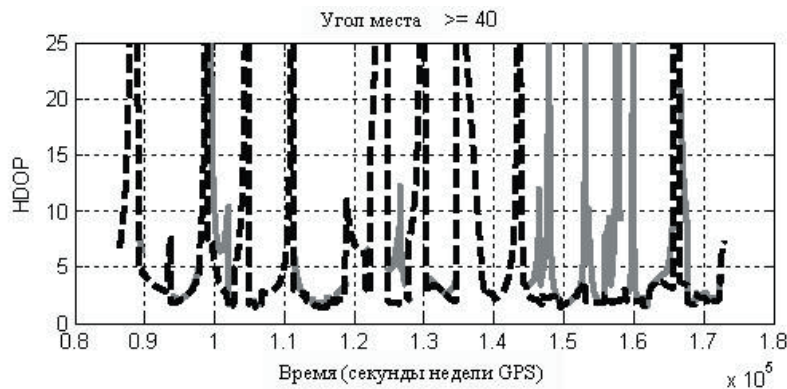


Рис. 14. Горизонтальный геометрический фактор HDOP: — задача без дополнительного условия; --- задача с дополнительным условием



Дохов Александр Иванович, кандидат технических наук, профессор, заместитель проректора по научной работе Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: радиометрия, радиолокация.



Лукьянова Ольга Алексеевна, ведущий инженер НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с применением сигналов ГНСС, безопасность дорожного движения.



Лукьянов Александр Михайлович, заведующий ПНИЛ Спутниковой навигации и инфокоммуникации НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с применением сигналов ГНСС.



Галевич Максим Николаевич, ведущий инженер НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с применением сигналов ГНСС, безопасность дорожного движения.



Гринченко Елена Владимировна, научный сотрудник ПНИЛ Спутниковой навигации и инфокоммуникации НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с применением сигналов ГНСС.

УДК 527.62:629.05

Визначення координат рухомого об'єкту з використанням кодових ГНСС-вимірювань і 3D карти місцевості / О.І. Дохов, О.М. Лук'янов, М.М. Галевич, О.В. Грінченко, О.О. Лук'янова // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2012. — Том 11. № 3. — С. 321–327.

Пропонується метод підвищення точності визначення координат рухомого об'єкту у реальному масштабі часу. Приведені алгоритм та формули рішення навігаційної задачі з підстановкою додаткового рівняння поверхні місцеположення.

Ключові слова: супутникова навігація, навігаційна задача, 3D карта, поверхня місцеположення.

Л. 14. Бібліогр.: 3 найм.

UDC 527.62:629.05

Determining coordinates of a moving object with the use of code GNSS-measurements and 3D terrain map / A.I. Dohov, A.M. Luk'yanov, M.N. Galevich, E.V. Grinchenko, O.A. Luk'yanova // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2012. Vol. 11. № 3. — P. 321–327.

The paper proposes a method for improving the accuracy of positioning a movable object in real time as well as it describes an algorithm and formulas for solving a navigation problem with a substitution of an additional location surface equation.

Keywords: satellite navigation, navigation problem, 3D map, location surface.

Fig. 14. Ref: 3 items.