

УДК 621.371

В.Н. Дейнеко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Проведены исследования влияния ионосферной погрешности измерений псевдодальностей на точность определения координат с использованием аппаратуры спутниковых радионавигационных систем. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить степень ухудшения точности определения координат навигационного потребителя из-за влияния ионосферной погрешности измерения псевдодальностей. Получены аналитические выражения, определяющие влияние ионосферы на точность определения координат для простейшего случая определения только плановых координат по двум измерениями и определения трех координат по многим измерениям.

Ключевые слова: ионосфера, спутниковая радионавигационная система, электронная концентрация, псевдодальность.

Введение

Постановка проблемы. Влияние ионосферы на распространение сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) заключается в том что, время прохождения сигнала через слой ионосферы отличается от времени его распространения в вакууме. В зависимости от методов измерения навигационных параметров (фазового или кодового) навигационный сигнал распространяется через слой ионосферы с ускорением либо с замедлением. В СРНС одним из основных навигационных параметров является псевдодальность от навигационного космического аппарата до фазового центра приемной антенны.

Степень влияния ионосферы на точность измерения псевдодальности зависит от многих факторов таких как, солнечная активность, сезон года, местоположения, местное время, цикла солнечной активности, угла возвышения на спутник и т.д.

За последние годы выполнено значительное количество теоретических и практических исследований, в которых приводятся числовые характеристики ионосферных погрешностей измерения псевдодальностей, которые находятся в пределах от 5...100 метров [1 – 4, 8 – 11]. Однако, для потребителей СРНС важно знать степень ухудшения точности определения координат из-за влияния ионосферы, для чего необходимо определить взаимосвязь между ионосферной погрешностью измерений псевдодальностей и точностью определения координат пользователем СРНС.

В работе [2] приводятся числовые значения погрешностей определения координат, вызванные ионосферой, которые были получены экспериментальным путем. Однако они являются средними значениями, полученных на суточных интервалах, и справедливы только для тех точек или регионов, в

которых проводились измерения. В работе [3] указывается, что ухудшение точности определения координат из-за ионосферы равно произведению ионосферной погрешности измерения псевдодальностей и геометрического фактора. Однако такой подход может быть справедлив только при допущении о том, что измерения относительно всех видимых спутников являются равноточными.

Проведенный анализ литературы [1 – 4, 8 – 11] показал, что в настоящее время не существует единого методического подхода к определению степени влияния ионосферной погрешности измерений псевдодальностей на точность определения координат.

Целью работы является определение степени влияния ионосферной погрешности измерений псевдодальностей на точность определения координат потребителями СРНС.

Результаты исследований

Погрешности навигационных измерений делятся на две основных категории: случайные и медленноменяющиеся погрешности. Быстроменяющиеся погрешности определяются, прежде всего, тепловыми шумами передающих и приемных трактов, нестабильностью работы генераторов, спутников и приемников, флуктуациями среды распространения. Медленноменяющиеся погрешности определяются несоответствием моделей изменения во времени часов спутника и приемника, регулярными составляющими задержек сигналов в тропосфере и ионосфере.

Каждый вид погрешности по-разному влияет на точность навигационных определений.

В наиболее простом случае связь между погрешностями измерения псевдодальностей и точностью определения координат можно показать на примере двумерного случая. Точность вычисления

координат объекта в пространстве зависит от погрешностей определения поверхностей и линий положения, которые в свою очередь, обуславливаются погрешностями измерения радионавигационных параметров. Погрешности в определении поверхности (линии) положения равна расстоянию по нормали между двумя поверхностями (линиями) положения, соответствующими истинному и измеренному значениям навигационного параметра. В общем виде, уравнение навигационного параметра в произвольной декартовой системе координат имеет вид $p = p(x, y, z)$ - в пространстве, $p = p(x, y)$ - на плоскости. Каждой точке пространства можно сопоставить определенное числовое значение приведенной функции. Таким образом, можно получить скалярное поле значений навигационного параметра. Поскольку навигационный параметр p в рассматриваемом случае представляет собой уравнение псевдодальности, которое является непрерывной и дифференцируемой функцией, то изменение скалярного поля удобно описывать его градиентом. Если единичный вектор \vec{l} представляет собой вектор нормали к поверхности (линии) положения, направленный в сторону возрастания навигационного параметра p , то выражение, определяющее градиент имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial \ell} = \vec{l} \text{grad}(p). \quad (1)$$

Градиент является векторной величиной, показывающей направление скорейшего роста навигационного параметра, причем модуль градиента характеризует степень изменения скалярной функции p . Он дает возможность связать погрешность измеряемого параметра с погрешностью определения поверхностей положения $\Delta \ell$. Перейдя в (1) к конечным приращениям можно получить:

$$\Delta \ell = \Delta p / |\text{grad}(p)|. \quad (2)$$

Из (2) видно, что для уменьшения погрешностей определения поверхностей и линий положения следует увеличивать градиент поля навигационного параметра и повышать точность его измерения.

Если функция p задана аналитически в произвольной декартовой системе координат, то модуль градиента для поверхности положения имеет вид:

$$|\text{grad}(p)| = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2}. \quad (3)$$

На основе соотношений (1) – (3) можно получить погрешности определения линий положения для всех способов измерения навигационных параметров.

В рассматриваемом случае в состав измеряемых параметров входят только дальности до спут-

ников, поэтому линии равных дальностей имеют форму окружности. Это значит, что направление нормали совпадает с радиальным, а модуль градиента $|\text{grad} R| = 1$. Это можно показать аналитически, т.к. квадрат модуля градиента определяется суммой квадратов направляющих косинусов:

$$|\text{grad}(R)| = \sqrt{\cos_x^2 + \cos_y^2 + \cos_z^2} = 1.$$

где \cos_x, \cos_y, \cos_z – направляющие косинусы.

Из (2), (3) видно, что, используя дальномерный способ, точность определения линии положения объекта будет определяться точностью измерения дальности. Приведенные соотношения позволяют определить ошибки линии положения для единичной ошибки измерения дальности (два измерения дальности). Местоположение объекта определяется, как точка пересечения двух или более линий положения. Погрешности, возникающие при определении каждой линии положения, приводят к тому, что вычисленное местоположение объекта отличается от истинного. Так как потребитель находится на больших расстояниях от спутников (около 20 000 км), относительно которых определяются линии положения, и погрешности определения линий положения намного меньше этих расстояний, то семейство линий положения, в окрестности точки потребителя можно считать отрезками параллельных прямых независимо от их формы. Геометрическая интерпретация изложенного представлена на рис. 1. Истинное положение объекта находится в точке M , которая является точкой пересечения линий положений AB и CD , соответствующих истинным значениям измеряемых параметров (рис. 1). Прямые $A'B'$ и $C'D'$ определяют линии положения с учетом погрешностей измерения, M' – вычисленное с погрешностями местоположения.

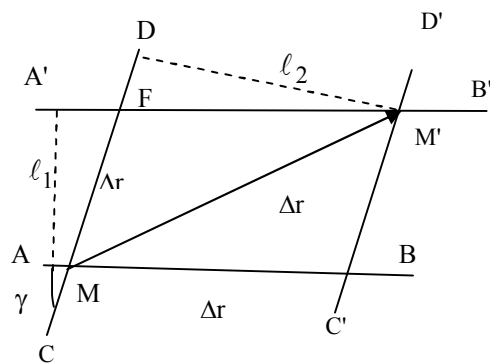


Рис. 1. Геометрическая интерпретация погрешности определения местоположения объекта на плоскости

Линии положения AB и CD пересекаются под углом γ . Точки M и M' смещены относительно друг друга на расстояние Δr , которое является погрешностью определения местоположения объекта. Ве-

личины ℓ_1 і ℓ_2 представляють собою лінійні погрешности определения линий положения АВ и CD, которые в данном случае являются погрешностями измерения псевдодальностей R_1 и R_2 .

Из геометрических соображений можно определить связь между линейными и радиальными погрешностями измерения псевдодальностей:

$$r_1 = \frac{\ell_1}{\sin \gamma} \quad r_2 = \frac{\ell_2}{\sin \gamma}. \quad (4)$$

Затем из треугольника MM'F, по теореме косинусов, находим:

$$\Delta r^2 = r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos \gamma.$$

Из последнего выражения с учетом (4) можно получить:

$$\Delta r = \frac{\sqrt{\ell_1^2 + \ell_2^2 + 2\ell_1 \ell_2 \cos \gamma}}{\sin \gamma}.$$

Так как погрешности ℓ_1 и ℓ_2 представляют собой случайные величины, то и погрешность определения местоположения объекта является случайной величиной.

Поэтому, выражение для определения СКО погрешности местоположения в зависимости от среднеквадратических отклонений измерения псевдодальностей можно записать

$$\sigma_{\Delta r} = \frac{\sqrt{\sigma_{\ell_1}^2 + \sigma_{\ell_2}^2 + 2\sigma_{\ell_1} \sigma_{\ell_2} \rho \cos \gamma}}{\sin \gamma}, \quad (5)$$

где ρ – коэффициент взаимной корреляции погрешностей измерений.

Из (5) видно, что СКО определения положения зависит от отклонения измерения псевдодальностей σ_{ℓ_1} и σ_{ℓ_2} , а также от угла пересечения линий положения γ и от взаимной корреляции ρ . Максимальная точность при заданных σ_{ℓ_1} и σ_{ℓ_2} будет тогда, когда линии положения пересекаются под углом 90° . Данные рассуждения дают представление о влиянии ионосферной погрешности измерений на точность определения координат для плоского случая.

На практике пространства измерений и определяемых параметров являются многомерными. Поэтому целесообразно определить степень влияния ионосферной погрешности при выполнении измерений относительно всех видимых НКА. Для этого необходимо рассмотреть модель измерений псевдодальности.

Рассмотрим случай, когда из систематических погрешностей измерений псевдодальностей присутствует только регулярная ионосфера. Для этого необходимо рассмотреть модель измерений псевдодальности.

В наиболее общем виде данная модель может быть представлена в виде:

$$\hat{D} = R_0 + \Delta r_{\text{и}} + \eta, \quad (6)$$

где R_0 – истинная дальность «потребитель – НКА»;

$\Delta r_{\text{и}}$ – систематическая ионосферная погрешность измерений;

η – случайная составляющая погрешности, (шумы приемной аппаратуры, многолучевость, нерегулярные атмосферные воздействия).

Влияние случайных ошибок измерений на точность оценивания параметров вектора состояния в значительной степени удастся снизить, используя специальные и статистические методы обработки измерительной информации. Поэтому основной вклад в ухудшение точности измерения каждой псевдодальности будет вносить систематическая погрешность, обусловленная влиянием ионосферы $\Delta r_{\text{и}}$.

Если принять, что систематические погрешности отсутствуют, а случайные η – представляют собой случайные величины с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей K_D , то оценки искомого вектора \bar{X} могут быть найдены методом наименьших квадратов [5, 6].

Точность полученных при этом оценок будет характеризоваться корреляционной матрицей следующего вида:

$$K_{\bar{X}} = (A^T K_D A)^{-1}.$$

где $A = \left\| \frac{\partial \bar{D}}{\partial \bar{X}} \right\|$ – матрица производных измеряемых псевдодальностей по определяемым элементам вектора состояния;

\bar{D} – вектор, элементами, которого являются измеренные псевдодальности;

$\bar{X} = \| X, Y, Z \|$ – вектор состояния потребителя (координаты);

K_D – корреляционная матрица погрешностей измерения псевдодальностей.

При этом оценка вектора состояния, определяемая по МНК, рассчитывается по формуле [7]:

$$\bar{X}_i = \bar{X}_{i-1} + (A_{i-1}^T K_D^{-1} A_{i-1})^{-1} A_{i-1}^T K_D^{-1} \times [\bar{D} - \bar{R}(\bar{X}_{i-1})], \quad (7)$$

где $\bar{R}(\bar{X}_{i-1})$ – дальность, до спутника рассчитанная из координат потребителя, полученных на предыдущей итерации.

Точность определения вектора состояния согласно (7), при наличии в измерениях регулярной ионосферной составляющей, можно найти, определив математическое ожидание вектора оценок \bar{X} :

$$\begin{aligned} M[\widehat{\bar{X}}] &= M\{\widehat{\bar{X}}_{i-1} + (A_i^T K_D^{-1} A_i)^{-1} A_i^T K_D^{-1} [\bar{D}_i - \bar{R}(\widehat{\bar{X}}_{i-1})]\} = \\ &= \bar{X}_{i-1} + (A_i^T W_D A_i)^{-1} A_i^T W_D \{ \bar{R}_0 + \bar{\eta} + \bar{\Delta r}_i - \bar{R}(\bar{X}_{i-1}) \} = \\ &= \widehat{\bar{X}}_{i-1} + \bar{X}_0 + (A_i^T W_D A_i)^{-1} A_i^T W_D \bar{\Delta r}_i - \widehat{\bar{X}}_{i-1} = \\ &= \bar{X}_0 + (A_i^T W_D A_i)^{-1} A_i^T W_D \bar{\Delta r}_i, \end{aligned} \quad (8)$$

где \bar{X}_0 – вектор истинных значений координат потребителя.

Выражение (8) получено с учетом того, что $M\{\bar{\eta}\} = 0$, а величины \bar{R}_0 , $\bar{\Delta r}_i$, $\bar{R}(\bar{X}_{i-1})$ – являются статистически независимыми.

Вторая составляющая (8) характеризует величину смещения математического ожидания \bar{X} от его истинного значения.

Из (8) также видно, что оценки состояния вектора потребителя, полученные по (7) являются смещенными на величину

$$(A_i^T W_D A_i)^{-1} A_i^T W_D \bar{\Delta r}_i.$$

Смещение полученных оценок будет определяться систематической погрешностью измерения $\bar{\Delta r}_i$, которая обусловлена влиянием ионосферы. Помимо смещения наличие $\bar{\Delta r}_i$ приведет к искажению характеристик рассеивания оценок относительно их истинных значений.

Значения характеристик рассеивания можно получить, определив матрицу вторых начальных моментов оценок $\tilde{K}_{\bar{X}}$:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{\bar{X}} &= M\{(\widehat{\bar{X}})(\widehat{\bar{X}})^T\} = \\ &= M\{[\bar{X}_{i-1} + (A_i^T W_D A_i)^{-1} A_i^T W_D (\bar{D}_i - \bar{R}(\bar{X}_{i-1}))] \times \\ &\times [\bar{X}_{i-1} + (A_i^T W_D A_i)^{-1} A_i^T W_D (\bar{D}_i - \bar{R}(\bar{X}_{i-1}))]^T\}. \end{aligned}$$

Для упрощения дальнейших выкладок необходимо ввести обозначение:

$$\nabla = (A^T W_D A)^{-1} A^T W_D.$$

Тогда выражение, определяющее корреляционную матрицу, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_X &= M\{(\widehat{\bar{X}})(\widehat{\bar{X}})^T\} = M\{[\widehat{\bar{X}}_{i-1} + \nabla \cdot (\bar{D}_i - \bar{R}(\widehat{\bar{X}}_{i-1}))] \times \\ &[\widehat{\bar{X}}_{i-1} + \nabla \cdot (\bar{D}_i - \bar{R}(\widehat{\bar{X}}_{i-1}))]^T\}. \end{aligned}$$

С учетом того, что модель измеренной псевдодальности \bar{D}_i принята в виде (1), выражение для корреляционной матрицы приобретает вид:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_X &= \\ &= M\{[\bar{X}_{i-1} + \nabla \cdot \bar{R}_0 + \nabla \cdot \bar{\Delta r}_i + \nabla \cdot \bar{\eta} - \nabla \cdot \bar{R}(\bar{X}_{i-1})] \times \\ &[\bar{X}_{i-1} + \nabla \cdot \bar{R}_0 + \nabla \cdot \bar{\Delta r}_i + \nabla \cdot \bar{\eta} - \nabla \cdot \bar{R}(\bar{X}_{i-1})]^T\}. \end{aligned}$$

Учитывая, что

$$\nabla \cdot \bar{R}_0 = (A^T W_D A)^{-1} A^T W_D \bar{R}_0 = \bar{X}_0,$$

целесообразно принять допущение о том, что вектор истинных координат совмещен с началом отсчета, в этом случае \bar{X}_0 будет равен нулю. Кроме этого, известно, что [5]

$$\nabla \cdot \bar{R}(\widehat{\bar{X}}_{i-1}) = (A^T W_D A)^{-1} A^T W_D \bar{R}(\widehat{\bar{X}}_{i-1}) = \widehat{\bar{X}}_{i-1}.$$

Учитывая принятые допущения, корреляционная матрица примет вид:

$$\tilde{K}_X = M\{[\nabla \cdot \bar{\eta} + \nabla \cdot \bar{\Delta r}_i] \times [\nabla \cdot \bar{\eta} + \nabla \cdot \bar{\Delta r}_i]^T\}.$$

Осуществляя операцию математического ожидания, транспонирования и раскрывая скобки составляющих полученного выражения можно получить:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{\bar{X}} &= (A^T W_D A)^{-1} + (A^T W_D A)^{-1} \times \\ &A^T W_D \bar{\Delta r}_i \bar{\Delta r}_i^T W_D A (A^T W_D A)^{-1}. \end{aligned}$$

Данное выражение получено с учетом того, что

$$M\{\bar{\eta}\} = 0, M\{\bar{\eta}^T\} = 0, M\{\bar{\eta} \bar{\eta}^T\} = W_D^{-1},$$

а также что матрица W_D и квадратичная форма $(A^T W_D A)^{-1}$ являются симметричными.

С учетом введенных обозначений выражение для корреляционной матрицы погрешностей определения координат можно записать как:

$$\tilde{K}_{\bar{X}} = (A^T W_D A)^{-1} + \nabla \bar{\Delta r}_i \bar{\Delta r}_i^T \nabla^T. \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что первое слагаемое представляет собой корреляционную матрицу погрешностей определения координат, в случае если в измерениях не было систематической составляющей обусловленной ионосферной погрешностью.

Второе слагаемое (9) представляет собой квадрат смещения математического ожидания вектора оценок получаемого согласно (7).

Из (9) видно, что пренебрежение ионосферной составляющей погрешности приводит к ухудшению точности определения вектора состояния на величину $\nabla \bar{\Delta r}_i \bar{\Delta r}_i^T \nabla^T$.

Выводы

Выполненные теоретические исследования, позволили получить аналитические выражения, позволяющие оценить степень влияния ионосферной погрешности измерений псевдодальностей на точность определения координат потребителя.

Использовать полученные аналитические выражения можно для проведения предварительных расчетов и оценки потенциальной точности существующих или перспективных систем и комплексов, использующих спутниковые навигационные технологии. Также полученные выражения можно использовать для оценки степени влияния ионосферы на точность определения координат с использовани-

ем сигналів любых СРНС (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и др.).

Кроме этого, значения ионосферных погрешностей определения псевдодальностей вообще могут быть получены из беспутниковых систем (станции вертикального ионосферного зондирования, сигналы любого спутника на двух частотах и т.д.).

Список литературы

1. Колосов М.А. Распространение радиоволн при космической связи / М.А. Колосов, Н.А. Арманд, О.И. Яковле. – М.: Связь, 1969. – 155 с.
2. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера / Я.Л. Альперт. – М.: Наука, 1972. – 563 с.
3. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
4. Деденок В.П. Комплекс оперативного трехмерного мониторинга ионосферы с использованием сигналов GNSS / В.П. Деденок, С.Н. Флерко, Ю.В. Резников // Материалы первого украинско-китайского форума “Наука - производство”. – Х.: ХНУРЭ, 2007. – 132 с.
5. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами / В.М. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 2001. – № 1. – С. 47-52.
6. Котляшкин С.И. Определение ионосферной задержки сигналов в одночастотной аппаратуре потребителей спутниковой системы навигации NAVSTAR / С.И. Котляшкин // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – №5. – С. 85-95.
7. Тучин Д.А. Кодовые измерения псевдодальности системы GPS. Модель ошибок и априорная оценка точности определения вектора положения / Д.А. Тучин // Российская Академия Наук, Ордена Ленина Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша. – М.: 2002. – 17 с.
8. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 257 с.
9. Глобальная система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз: переклад з англ., під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.
10. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений / Б.Ф. Жданюк. – М.: Сов. радио, 1978. – 350 с.
11. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Советское радио, 1974. – 432 с.
12. Губин В.А. Основы радионавигационных измерений / В.А. Губин, Н.Ф. Клюев, А.А. Костылев и др. – М.: МО СССР, 1987. – 429 с.
13. S. Rajagopal, T. Walter, S. Datta-Barua, J. Blanch Correlation Structure of the Equatorial Ionosphere – Stanford University Takeyasu Sakai, Electronic Navigation Research Institute pp. 29 -36.
14. Lejeune R. El-Arini An Ionospheric Grid Algorithm for WAAS on the Minimum Mean Square Error Estimator / R. Lejeune, M. Barky. – Washington, August 27, 2003.
15. Zhang Y. TEC Measurement by Single Dual-frequency GPS Receiver / Y. Zhang, F. Wu, N. Kubo, A. Yasuda. 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533 Japan – P. 429–436.
16. Grewal M.S. Ionospheric Delay Validation using Dual Frequency Signal from GPS at GEO Uplink Subsystem Locations / M.S. Grewal, W. Brown, P. Hsu, R. Lucy // ION GPS' 99 – 14 – 17 September, 1999. – Nashville, TN, USA. – P. 1429–1436.

Поступила в редколлегию 5.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Г.В. Худов, Харьковський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО НАЗЕМНОГО ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПРИЙНЯТОЮ МОДЕЛЛЮ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНОСФЕРИ

В.М. Дейнеко

Проведено дослідження впливу іоносферної похибки вимірів псевдодальностей на точність визначення координат з використанням апаратури супутникових радіонавігаційних систем. Отримані аналітичні вирази, які дозволяють оцінити ступінь погіршення точності визначення координат навігаційного споживача обумовленої впливом іоносферної похибки вимірів псевдодальностей. Отримано аналітичні вирази, які визначають вплив іоносфери на точність визначення координат у найпростішому випадку визначення тільки планових координат по двох вимірах та визначення трьох координат по багатьом вимірам.

Ключові слова: іоносфера, супутникова радіонавігаційна система, електронна концентрація, псевдодальність.

RESEARCH INFLUENCE OF IONOSPHERE ERROR MEASUREMENTS PSEVDORANGES ON ACCURACY DETERMINATION POSITION WITH USE SATELLITE NAVIGATION EQUIPMENT

V.M. Deineko

Carry out research influence of ionosphere error measurements psevdoranges on accuracy determination position with use satellite navigation system. The results turned out makes it possible estimate degree degradation of accuracy determination position navigation user influence of ionosphere error measurements psevdoranges. Analytical express turn out which define influence of ionosphere on accuracy determination coordinate to simplest occurrence determination only plane coordinate with use two measurements and define third coordinate with use many measurements.

Keywords: ionosphere, satellite radionavigation system, electronic density, psevdorange.