

УДК 621.698.98:629.783

А.С. Гребень

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Для измерения координат объектов ГИС предлагается использовать навигационные космические аппараты только на геостационарной орбите. Анализируется существующая методика оценки потенциальной точности измерения координат объектов космической навигации с учётом геометрических соотношений в системе (геометрического фактора PDOP). Показывается, что использование геостационарных космических аппаратов для измерения координат объектов космической навигации затруднено. Анализируются объекты ГИС как объекты навигационных измерений. Предлагается использовать новый геометрический фактор PDOP-ГИС. Оценивается потенциальная точность измерения координат объектов ГИС с использованием геостационарных космических аппаратов и геометрического фактора PDOP-ГИС.

**Ключевые слова:** геоинформационная система (ГИС), космическая навигационная система (КНС), космический навигационный приёмник (КНП), навигационный космический аппарат (НКА), геостационарный космический аппарат (ГКА), геометрический фактор.

### Введение

Основными требованиями, предъявляемыми к современным КНС (ГЛОНАСС, GPS) являются требования глобальной точности измерения координат объектов навигации [1 – 3]. Для выполнения этих требований используются первичные измерения времени задержки и доплеровского смещения частоты навигационных радиосигналов не менее чем от 4-х НКА одновременно. По результатам первичных измерений определяются 3 пространственных координаты потребителя в прямоугольной геоцентрической системе координат, величина расхождения бортовой и наземной шкал времени, 3 составляющие скорости измерения координат потребителя и скорость расхождения бортовой и наземной шкал времени.

Требования к доступности, целостности и непрерывности навигационных обеспечений выполняются за счёт создания созвездия не менее чем 24-х НКА на круговых орбитах. Для измерения псевдодальностей используется пассивный (беззапросный) режим работы КНП потребителей.

В современных КНС (ГЛОНАСС, GPS) для решения задач навигационных определений используются результаты первичных измерений времени задержки и доплеровского смещения частот навигационных радиосигналов не менее чем от 4-х НКА одновременно [1 – 3].

По результатам первичных измерений определяются 3 пространственные координаты потребителя, величина расхождения бортовой и наземной шкал времени, 3 составляющих скорости изменения координат потребителя и скорость расхождения шкал времени.

Первичные измерения используются для навигационных определений положения и скорости наземных, морских, речных, воздушных и космических объектов. Алгоритм решения задач и точность навигационных определений для всех потребителей являются одинаковыми. Однако требования потребителей к объёму и точности навигационных измерений не являются одинаковыми. К таким объектам относятся объекты ГИС. Соответственно, решение задач навигационных определений приобретает особенности, которые требуют создания и использования специальных методик.

**Постановка задачи.** Поставим задачу измерения координат объектов ГИС с использованием в космическом секторе КНС созвездия НКА только на стационарной орбите и погрешностей измерения дальностей до ГКА. Для решения поставленной задачи будем считать, что:

- потребителю в составе навигационных сообщений передаются данные о положении и скорости движения ГКА,
- известны погрешности измерения дальностей до ГКА,
- объекты ГИС представляют собой неподвижные наземные объекты.

Для решения поставленной задачи уточним геометрический фактор КНС.

### Анализ существующей методики оценки потенциальной точности определения координат объектов космической навигации

Для характеристики потенциальной точности навигационных определений в настоящее время ис-

пользуются различные коэффициенты геометрии или геометрические факторы GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, TDOP [1 – 3].

Мерой уменьшения точности навигационных определений, учитывающих только особенности пространственного расположения КНП и НКА, является геометрический фактор PDOP. Для вычисления PDOP необходимо знать величины расстояний от КНП до 3х НКА.

В инерциальной геоцентрической системе координат искомые расстояния можно найти как

$$D_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $D_i$  – расстояние между КНП и  $i$ -м НКА (изменяемые КНП параметры);  $x, y, z$  – прямоугольные координаты КНП (искомые неизвестные);  $x_i, y_i, z_i$  – прямоугольные координаты  $i$ -го НКА (известные величины).

Абсолютные погрешности определения дальностей  $\Delta D_i$  можно найти из системы уравнений (1) с учётом того, что:

$\Delta D_1 = \Delta D_2 = \Delta D_3 = \Delta D$  – паспортные характеристики КНС;

$\Delta x_i = \Delta y_i = \Delta z_i = \Delta$  – искомая погрешность навигационных определений координат КНП.

По правилам вычисления абсолютных погрешностей [6] найдём

$$\Delta D = \begin{vmatrix} \frac{x - x_1}{D_1} & \frac{y - y_1}{D_1} & \frac{z - z_1}{D_1} \\ \frac{x - x_2}{D_2} & \frac{y - y_2}{D_2} & \frac{z - z_2}{D_2} \\ \frac{x - x_3}{D_3} & \frac{y - y_3}{D_3} & \frac{z - z_3}{D_3} \end{vmatrix} \times \Delta. \quad (2)$$

Определитель в правой части уравнения (2) равен  $6 \cdot V$ , где  $V$  – объём треугольной пирамиды, заключенный между ортами векторов [6, 7], направленных от КНП в направлении на 3 НКА.

Величина, обратная  $6 \cdot V$ , обозначается как

$$PDOP = 1 / (6V).$$

Соответственно погрешность или потенциальная точность определения положения КНП находится как

$$\Delta = PDOP \times \Delta D. \quad (3)$$

Для нормального функционирования КНС необходимо обеспечить  $PDOP < 6$  [1].

В зависимости от числа видимых НКА значение геометрического фактора изменяется (табл. 1) [1].

Вычисление геометрического фактора при определении координат объектов ГИС имеет свои особенности.

Таблица 1

Геометрический фактор КНС

Параметры	Число видимых НКА					
	4	5	6	7	8	9
HDOP	1,41	1,26	1,15	1,03	0,95	0,89
VDOP	2,0	1,75	1,7	1,61	1,6	1,55
TDOP	1,13	1,03	1,03	0,95	0,93	0,91
PDOP	2,45	2,16	2,05	1,91	1,86	1,79
GDOP	2,69	2,39	2,3	2,13	2,08	2,01

### Оценка потенциальной точности измерения координат объектов ГИС с помощью геостационарных НКА

К объектам ГИС относятся различные объекты, положение которых определяется в какой-либо неподвижной наземной системе координат (например, географической) [4, 5]. К таким объектам относятся геологические объекты, объекты топогеодезических и землеустроительных служб, объекты железнодорожных и автомобильных путей сообщения, аэродромов, морских и речных портов, объекты промышленного, сельскохозяйственного, научного, культурного, спортивного, экскурсионного и другого назначения, различные объекты космического мониторинга окружающей среды [8]. Все эти объекты, а также многие военные объекты в рассматриваемой задаче целесообразно отнести к неподвижным наземным объектам [9].

Положения (координаты) неподвижных наземных объектов могут быть определены не только в инерциальной геоцентрической системе координат  $x, y, z$  [1 – 3], но и в географической системе координат  $\lambda, \varphi$ . Такой переход может быть сделан по правилам перехода от прямоугольной к сферической системе координат [6, 7]:

$$\begin{cases} x = R_3 \times \cos \lambda \times \cos \varphi; \\ y = R_3 \times \sin \lambda \times \cos \varphi; \\ z = R_3 \times \sin \varphi, \end{cases} \quad (4)$$

где  $R_3 = 6371$  км – радиус Земли.

Теперь для навигационного определения объектов ГИС потребуется находить не три неизвестных координаты  $(x, y, z)$ , а только две неизвестные координаты  $(\lambda, \varphi)$ .

После нахождения географических координат  $(\lambda, \varphi)$  по формуле (4) может быть сделан обратный переход и найдены абсолютные геоцентрические координаты.

Для определения 2х неизвестных величин (координат) в уравнениях (1) с учётом (4) достаточно вместо 3-х уравнений иметь 2 из них.

Для примера возьмём следующую пару уравнений

$$\begin{cases} D_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}; \\ D_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2}. \end{cases} \quad (5)$$

Измеряемые дальности  $D_i$  представили в их проекциях на 3 координатные плоскости (X,Y,Z)  $d_{ki}$  [9]:

$$\begin{cases} d_{1i}^2 = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2; \\ d_{2i}^2 = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2; \\ d_{3i}^2 = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2, \end{cases} \quad (6)$$

где  $d_{ki}$  – проекции измеряемых дальностей  $D_i$ ;  $k$  – номер координатной плоскости.

Абсолютные погрешности определения проекций  $\Delta d_{ki}$  найдём из (6).

Для этого при использовании 2-х НКА из (6) получим следующие системы уравнений [9]:

$$\begin{cases} \begin{cases} d_{11}^2 = (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2; \\ d_{12}^2 = (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2, \end{cases} \\ \begin{cases} d_{21}^2 = (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2; \\ d_{22}^2 = (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2, \end{cases} \\ \begin{cases} d_{31}^2 = (x-x_1)^2 + (z-z_1)^2; \\ d_{32}^2 = (x-x_2)^2 + (z-z_2)^2, \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

Теперь абсолютные погрешности определения координат в проекциях на координатные плоскости найдём из (7) как

$$\begin{aligned} \Delta d_1 &= \begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 \\ d_{11} & d_{11} \\ x-x_2 & y-y_2 \\ d_{12} & d_{12} \end{vmatrix} \times \Delta; \\ \Delta d_2 &= \begin{vmatrix} y-y_1 & z-z_1 \\ d_{21} & d_{21} \\ y-y_2 & z-z_2 \\ d_{22} & d_{22} \end{vmatrix} \times \Delta; \\ \Delta d_3 &= \begin{vmatrix} x-x_1 & z-z_1 \\ d_{31} & d_{31} \\ x-x_2 & z-z_2 \\ d_{32} & d_{32} \end{vmatrix} \times \Delta. \end{aligned} \quad (8)$$

В правых частях уравнений (8) стоят удвоенные значения площадей, заключённых между проекциями ортов соответствующих векторов на координатные плоскости [6, 7].

Поэтому

$$\begin{cases} \Delta d_1 = 2S_1 \times \Delta; \\ \Delta d_2 = 2S_2 \times \Delta; \\ \Delta d_3 = 2S_3 \times \Delta, \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} 2S_1 &= \begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 \\ d_{11} & d_{11} \\ x-x_2 & y-y_2 \\ d_{12} & d_{12} \end{vmatrix}, \\ 2S_2 &= \begin{vmatrix} y-y_1 & z-z_1 \\ d_{21} & d_{21} \\ y-y_2 & z-z_2 \\ d_{22} & d_{22} \end{vmatrix}, \\ 2S_3 &= \begin{vmatrix} x-x_1 & z-z_1 \\ d_{31} & d_{31} \\ x-x_2 & z-z_2 \\ d_{32} & d_{32} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Окончательно абсолютные значения погрешностей определения координат объектов ГИС при использовании 2х НКА найдём как

$$\begin{aligned} \Delta D &= \sqrt{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2 + \Delta d_3^2} = \\ &= 2 \times \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} = 2 \times S, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $S$  – площадь, заключённая между ортами векторов, направленных от КНП-потребителя навигационных определений на любые 2 НКА.

Из (10) найдём

$$\Delta = \frac{\Delta D}{2S}. \quad (11)$$

Величину  $\frac{1}{2S}$  обозначим аналогично PDOP геометрическим фактором КНС при определении координат объектов ГИС  $\frac{1}{2S} = \text{PDOP-ГИС}$ . Окончательно найдём [9]:

$$\Delta = \text{PDOP-ГИС} \times \Delta D. \quad (12)$$

Для сравнительной оценки потенциальных точностей определения положения объектов ГИС при использовании 3-х и 2-х НКА приравняем погрешности (3) и (12). Получим

$$\text{PDOP} \times \Delta D = \text{PDOP-ГИС} \times \Delta D, \quad (13)$$

где  $\text{PDOP} = \frac{1}{6V}$ , а  $\text{PDOP-ГИС} = \frac{1}{2S}$ .

Для единичных векторов (ортов)

$$\begin{aligned} V &= \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{1 - \frac{4}{3} \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \\ S &= \sin \alpha, \end{aligned}$$

где  $\alpha$  – угол между ортами.

Из (13) получаем следующее граничное значение угла  $\alpha$ :

$$\alpha = 90^\circ.$$

Следовательно, потенциальные точности определения положения объектов ГИС по измерениям 3-х прямоугольных координат и по измерению 2-х географических координат сравниваются только при условии, если орты векторов, направленных от потребителя на НКА, являются ортогональными. Во всех остальных практически важных случаях потенциальная точность определения положения объектов ГИС по измерениям 2-х географических координат является более высокой.

### Выводы

Задача измерения координат объектов ГИС с помощью навигационных космических аппаратов на геостационарной орбите может быть решена на региональном уровне при выполнении следующих условий:

- измерение псевдодальностей до геостационарных космических аппаратов осуществляется активным (запросным) методом, вместо 3-х прямоугольных координат измеряют две географические координаты (долгота и широта);

- в космическом секторе КНС используется не менее двух навигационных космических аппаратов на геостационарной орбите;

- потенциальная точность измерения координат объектов ГИС зависит от геометрического фактора PDOP–ГИС, величине обратно пропорциональной площади, заключённой между ортами векторов, направленных от космических навигационных приёмников потребителей навигационных определений на любые 2 НКА.

Для повышения точности навигационных определений объектов ГИС целесообразно выбирать

пару НКА, вектора направлений на которые являются ортогональными или близкими к ортогональным.

### Список литературы

1. Глобальная национальная спутниковая система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
2. Соловьёв Ю.А. Спутниковая навигация и её приложения / Ю.А. Соловьёв. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 236 с.
3. Гофман-Велленгофф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS) / Б. Гофман-Велленгофф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.
4. Королёв Ю.К. Общая геоинформатика. Часть 1 / Ю.К. Королёв. – М. Изд. ООО СП ДАТА+, 1998. – 120 с.
5. Шаши Шекхар. Основы пространственных баз данных / Шаши Шекхар, Санжей Гаула. – М.: Кудиц-образ, 2004. – 322 с.
6. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семенов. – М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 718 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1997. – 832 с.
8. Красовский Г.Я. Введение в методы космического мониторинга окружающей среды / Г.Я. Красовский, В.А. Петросов. – Х.: ХАИ, 1999. – 206 с.
9. Красовский Г.Я. Оценка потенциальной точности космических навигационных определений координат объектов ГИС / Г.Я. Красовский, О.С. Бутенко, А.С. Гребень // *Екологічна безпека та природокористування: збірник наукових праць*. – К., 2009. – Вип. 3. – С. 114-123.

Поступила в редколлегию 24.12.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Д.В. Голкин, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТІВ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ НАВІГАЦІЙНИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ НА ГЕОСТАЦІОНАРНІЙ ОРБИТІ

О.С. Гребень

Для вимірювання координат об'єктів ГИС пропонується використовувати навігаційні космічні апарати тільки на геостационарній орбіті. Аналізується існуюча методика оцінки потенційної точності вимірювання координат об'єктів космічної навігації з урахуванням геометричних співвідношень в системі (геометричного чинника PDOP). Показується, що використання геостационарних космічних апаратів для вимірювання координат об'єктів космічної навігації утруднене. Аналізуються об'єкти ГИС як об'єкти навігаційних вимірювань. Пропонується використовувати новий геометричний чинник PDOP–ГИС. Оцінюється потенційна точність вимірювання координат об'єктів ГИС з використанням геостационарних космічних апаратів і геометричного чинника PDOP–ГИС.

**Ключові слова:** геоінформаційна система, космічна навігаційна система, космічний навігаційний приймач, навігаційний космічний апарат, геостационарний космічний апарат, геометричний чинник.

## ESTIMATION OF POSSIBILITIES OF MEASURING OF CO-ORDINATES OF OBJECTS GIS BY VEHICLES OF SPACES OF NAVIGATIONS ON GEOSTATIONARY ORBIT

A.S. Greben'

For measuring of co-ordinates of objects GIS it is suggested to use the vehicles of spaces of navigations only on a geostationary orbit. The existent method of estimation of potential exactness of measuring of co-ordinates of objects of space navigation is analysed taking into account geometrical correlations in the system (geometrical factor of PDOP). Shown, that the use of geostationary vehicles of spaces for measuring of co-ordinates of objects of space navigation is laboured. Objects are analysed GIS as objects of measurings of navigations. It is suggested to use the new geometrical factor of PDOP-GIS. Potential exactness of measuring of co-ordinates of objects is estimated GIS with the use of geostationary vehicles of spaces and geometrical factor of PDOP-GIS.

**Keywords:** GIS, space navigation system, space navigation receiver, navigation space vehicle, geostationary space vehicle, geometrical factor.