

УДК 551.465

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ГИС

Г.Я. Красовский, д-р техн. наук, проф.
(Институт проблем национальной
безопасности СНБО Украины);
О.С. Бутенко, канд. техн. наук;
А.С. Гребень
(Харьковский национальный аэрокосмический
университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»)

Рассматривается малоизученная в настоящее время задача космических навигационных определений координат объектов ГИС как неподвижных наземных объектов. Анализируется существующая методика оценки потенциальной точности определений координат объектов космической навигации в зависимости от геометрического положения потребителя относительно созвездия навигационных космических аппаратов. Для оценки потенциальной точности космических определений координат объектов ГИС вводится понятие геометрического фактора PDOP-ГИС. Разрабатывается методика вычисления геометрического фактора PDOP-ГИС. Оценивается потенциальная точность навигационных определений.

Розглядається маловивчена в нинішній час задача космічних навігаційних визначень координат об'єктів ГІС як нерухомих наземних об'єктів. Аналізується існуюча методика оцінювання потенційної точності визначення координат об'єктів космічної навігації в залежності від геометричного положення споживача відносно сузір'я навігаційних космічних апаратів. Для оцінки потенційної точності космічних визначень координат об'єктів ГІС вводиться поняття геометричного фактору PDOP-ГІС. Розробляється методика обчислення геометричного фактору PDOP-ГІС. Оцінюється потенційна точність навігаційних визначень.

The problem of space navigating definitions of GIS objects co-ordinates as motionless land objects is considered as insufficiently known now. The existing technique for estimation of potential accuracy of definitions of objects co-ordinates

© Г.Я. Красовский, О.С. Бутенко, А.С. Гребень, 2009

of space navigation depending on geometrical position of the consumer concerning constellation of navigating space vehicles is analyzed. For an estimation of potential accuracy of space definitions of GIS objects co-ordinates the concept of geometrical factor PDOP-GIS is entered. The technique of calculation of geometrical factor PDOP-GIS is developed. Potential accuracy of navigating definitions is estimated.

Введение

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, 2, 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 объему и точности навигационных измерений не являются одинаковыми. К таким объектам относятся объекты (ГИС). Соответственно, решение навигационных определений приобретает особенности, которые требуют создания и использования специальных методик.

Постановка задачи

Поставим задачу оценки потенциальной точности космических навигационных определений координат объектов ГИС с учётом геометрического положения потребителя относительно созвездия НКА и погрешностей измерения дальностей до НКА. Для решения поставленной задачи будем считать, что:

* Геоинформационная система – ГИС; космическая навигационная система – КНС; космический навигационный приемник – КНП; навигационный космический аппарат – НКА.

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

Для решения поставленной задачи уточним и будем использовать геометрический фактор КНС.

Анализ существующей методики оценки потенциальной точности определения координат объектов космической навигации

Для характеристики потенциальной точности навигационных определений в настоящее время используются различные коэффициенты геометрии или геометрические факторы GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, TDOP [1, 2, 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

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

где D_i – расстояние между КНП и i -м НКА (измеряемые 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 ΔD_i можно найти из системы уравнений (1) с учётом того, что

$$\Delta D_1 = \Delta D_2 = \Delta D_3 = \Delta D \text{ – паспортные характеристики КНС,}$$

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

По правилам вычисления абсолютных погрешностей [7] найдём

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

В правой части уравнения (2) величина

$$\begin{vmatrix} \frac{x-x_1}{D_1} & \frac{y-y_1}{D_1} & \frac{z-z_1}{D_1} \\ \frac{x-x_2}{D_2} & \frac{y-y_2}{D_2} & \frac{z-z_2}{D_2} \\ \frac{x-x_3}{D_3} & \frac{y-y_1}{D_3} & \frac{z-z_3}{D_3} \end{vmatrix} = 6V,$$

где V – объем треугольной пирамиды, заключенный между ортами векторов [7, 8], направленных от КНП в направлении на 3 НКА. Величина, обратная 6V, обозначается как PDOP = $\frac{1}{6V}$.

Соответственно погрешность или потенциальная точность определения положения КНП находится как

$$\Delta = \text{PDOP} * \Delta D. \quad (3)$$

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

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 [6]. Все эти объекты, а также многие военные объекты в рассматриваемой задаче целесообразно отнести к неподвижным наземным объектам.

Положения (координаты) неподвижных наземных объектов могут быть определены не только в инерциальной геоцентрической системе координат x, y, z [1, 2, 3], но и в географической системе координат $л, ц$. Такой переход может быть сделан по правилам перехода от прямоугольной к сферической системе координат [6, 7].

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

где $R_3 = 6371$ км – радиус Земли.

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

Теперь для навигационного определения объектов ГИС потребуются находить не три неизвестные координаты (x , y , z), а только две неизвестных координаты (l , $ц$). После нахождения географических координат (l , $ц$) по формуле (4) может быть сделан обратный переход и найдены абсолютные геоцентрические координаты.

Для определения 2-х 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} ,

$$\begin{cases} d_{11}^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_{21}^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2, \\ d_{31}^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \end{cases} \quad (6)$$

где k – номер координатной плоскости.

Абсолютные погрешности определения проекций Dd_{ki} находятся из (6).

При использовании 2-х НКА из (6) получим следующие системы уравнений:

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

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

$$\Delta d_1 = \begin{vmatrix} \frac{x-x_1}{d_{11}} & \frac{y-y_1}{d_{11}} \\ \frac{x-x_2}{d_{12}} & \frac{y-y_2}{d_{12}} \end{vmatrix} * \Delta, \quad \Delta d_2 = \begin{vmatrix} \frac{y-y_1}{d_{21}} & \frac{z-z_1}{d_{21}} \\ \frac{y-y_2}{d_{22}} & \frac{z-z_2}{d_{22}} \end{vmatrix} * \Delta,$$

$$\Delta d_3 = \begin{vmatrix} \frac{x-x_1}{d_{31}} & \frac{z-z_1}{d_{31}} \\ \frac{x-x_2}{d_{32}} & \frac{z-z_2}{d_{32}} \end{vmatrix} * \Delta.$$
(8)

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

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

где

$$2S_1 = \begin{vmatrix} \frac{x-x_1}{d_{11}} & \frac{y-y_1}{d_{11}} \\ \frac{x-x_2}{d_{12}} & \frac{y-y_2}{d_{12}} \end{vmatrix}, \quad 2S_2 = \begin{vmatrix} \frac{y-y_1}{d_{21}} & \frac{z-z_1}{d_{21}} \\ \frac{y-y_2}{d_{22}} & \frac{z-z_2}{d_{22}} \end{vmatrix},$$

$$2S_3 = \begin{vmatrix} \frac{x-x_1}{d_{31}} & \frac{z-z_1}{d_{31}} \\ \frac{x-x_2}{d_{32}} & \frac{z-z_2}{d_{32}} \end{vmatrix}.$$
(9)

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

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

$$\Delta D = \sqrt{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2 + \Delta d_3^2} = 2 * \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} = 2 * S, \quad (10)$$

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

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

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

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

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

Для единичных векторов (ортов)

$$V = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{1 - \frac{4}{3} \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$S = \sin \alpha,$$

где α – угол между ортами.

Из (13) получаем следующее граничное значение угла α :

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

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

Таким образом, для определения положения объектов ГИС допускается, что число одновременно наблюдаемых НКА может быть сокращено на 1 без ухудшения точностных характеристик системы НКА. За счёт этого может быть повышена надёжность навигационных определений. Геометрический фактор КНС PDOP-ГИС при определении координат объектов ГИС, в отличие от геометрического фактора PDOP, обратно пропорционален площади, заключённой между ортами векторов, направленных от КНП-потребителя навигационных определений на любые 2 НКА. Для повышения точности навигационных определений объектов ГИС целесообразно выбирать пару НКА, векторы направлений на которые являются ортогональными или близкими к ортогональным.

* * *

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. Ліхтенгер, Д. Коллінз. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

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. Красовский Г.Я. Введение в методы космического мониторинга окружающей среды / Г.Я. Красовский, В.А. Петросов. – Х.: ХАИ, 1999. – 206 с.
7. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 718 с.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1997. – 832 с.

Отримано 12.03.2009 р.