

УДК 629.783

© Катков К.А., Скорынина С.А., Окулова М.С.  
Katkov K.A., Skorinina S.A., Okulova M.S.ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПСЕВДОСПУТНИКА В ЦЕНТРЕ ЗЕМЛИ В СПУТНИКОВЫХ  
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХPSEUDOSATELLITE-COMPANION USE IN THE CENTER OF THE EARTH FOR THE  
DECISION OF THE NAVIGATING PROBLEM IN SATELLITE  
RADIO NAVIGATING SYSTEMS

**Аннотация.** В статье рассматривается задача определения координат потребителя спутниковой радионавигационной системы в случаях, когда в зоне радиовидимости потребителя находится только три навигационных космических аппарата, а в качестве четвертого используется псевдоспутник, имеющий координаты центра Земли.

**Annotation.** In article the problem of definition of coordinates of the consumer of satellite radio navigating system in cases when in a zone of radio visibility of the consumer is only three navigating space vehicles is considered, and as the fourth the pseudosatellite having co-ordinates of the centre of the Earth is used.

**Ключевые слова.** Спутниковая радионавигационная система, псевдоспутник, искусственные возмущения ионосферы.

**Key words.** Satellite radio navigating system, the pseudosatellite, artificial indignations of an ionosphere.

## Введение

Искусственные возмущения ионосферы (ИВИ), создаваемые в слое F, приводят к возникновению области повышенной ионизации (ОПИ). Если через ОПИ проходит широкополосный навигационный радиосигнал (НРС), то он подвергается частотно-селективным замираниям (ЧСЗ). При этом многократно возрастает погрешность измерения псевдодальности [1]. Возникновение ЧСЗ хотя бы в одной радиолинии может привести к возрастанию погрешности позиционирования до 103 м и невыполнению требований к точности СРНС [2]. В этом случае имеет смысл перейти на работу с альтернативным рабочим созвездием НКА, то есть исключить аппарат, сигнал которого подвержен ЧСЗ, и ввести вместо него новый НКА, находящийся в зоне видимости навигационной аппаратуры потребителя (НАП) (рис.1а). Если орбитальная группировка НКА не развернута до штатно-

го состава или часть НКА выведена из строя, то возможна ситуация, когда в зоне радиовидимости потребителя будет находиться не более четырех НКА. В этом случае предлагается вместо исключаемого из созвездия аппарата (НКА№4) использовать псевдоспутник, располагаемый в центре Земли ( $O_3$ ) (рис.1б).

В случае, когда вместо 4-го НКА созвездия используется псевдоспутник в центре Земли, роль дальности до него выполняет геоцентрическая высота точки нахождения потребителя ( $R_3$ ). Тогда матрица координат НКА в гринвичской геоцентрической системе координат (ГСК) принимает вид

$$F = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & 0 \\ y_1 & y_2 & y_3 & 0 \\ z_1 & z_2 & z_3 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

а вектор измеренных значений псевдодальностей определяется, как

*Катков Константин Александрович – начальник научно-исследовательской лаборатории Ставропольского военного института связи Ракетных войск, тел. 8-918-861-98-02;*

*Скорынина Софья Андреевна – студентка 4-го курса Ставропольского государственного университета;*

*Окулова Мария Сергеевна – студентка 4-го курса Ставропольского государственного университета.*

*Katkov Konstantin Aleksandrovich – the chief of research laboratory of the Stavropol military institute of communication the rocket armies, ph. 8-918-861-98-02;*

*Skorinina Sofya Andreevna – a student of the Stavropol military institute of communication the rocket armies;*

*Okulova Maria Sergeevna – a student of the Stavropol military institute of communication the rocket armies.*

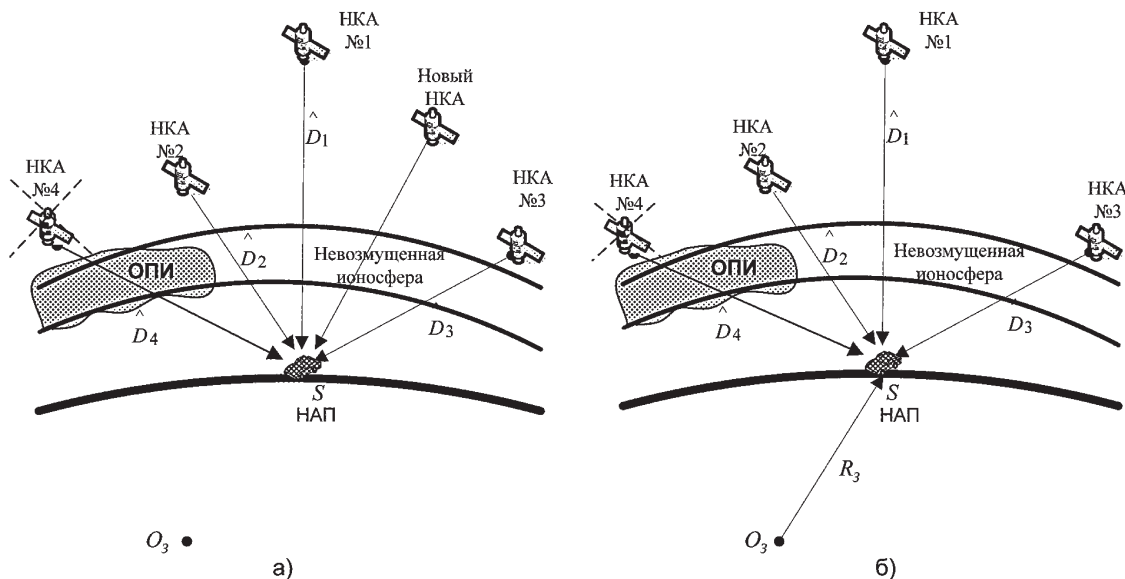


Рис. 1. Выбор альтернативного созвездия НКА:  
 а – с использованием нового НКА; б – с использованием псевдоспутника в центре Земли

$$D = \left[ \hat{D}_1, \hat{D}_2, \hat{D}_3, R_3 \right]^T. \quad (2)$$

Задача определения вектора состояния потребителя по сигналам трех НКА решается только в случае, когда с высокой точностью известна геоцентрическая высота потребителя [3]. В данной статье предлагается алгоритм определения геоцентрической высоты потребителя только по сигналам трех НКА без использования дополнительных измерений и систем (высотомер, инерциальная навигационная система, электронные карты и т.д.).

**Постановка задачи**

В зоне видимости НАП находятся только четыре НКА. Радиосигнал одного НКА попадает в ОПИ с неизвестными параметрами и подвергается ЧСЗ. НАП исключает из рабочего созвездия такой НКА и вводит вместо него псевдоспутник в центре Земли. Требуется найти геоцентрическую высоту потребителя ( $R_3$ ) и решить задачу определения пространственно-временных координаты (ПВК) потребителя  $q = [X, Y, Z, \tau]$  по сигналам оставшихся трех НКА.

**Определение геоцентрической высоты**

Для определения геоцентрической высоты в точке нахождения потребителя проведем ряд геометрических построений. Обозначим: НКА №1 – А, НКА №2 – В, НКА №3 – С. Построим новую декартову систему координат  $Apnt$  с центром в точке А (НКА №1). Ось  $n$  направлена на точку С (НКА №3), ось  $t$  направлена к поверхности Земли перпендикулярно к плоскости тре-

угольника  $ABC$ . Ось  $p$  лежит в плоскости треугольника  $ABC$  и дополняет систему до правой. То есть треугольник  $ABC$  лежит на координатной плоскости  $nAp$ , а точка  $C$  принадлежит оси  $n$ . Навигационные аппараты имеют следующие координаты: в ГСК –  $O_3 = [0, 0, 0]$ ;  $A(x_1, y_1, z_1)$ ;  $B(x_2, y_2, z_2)$ ;  $C(x_3, y_3, z_3)$ ; в новой системе  $Apnt$  –  $A(0, 0, 0)$ ;  $B(p_B, n_B, 0)$ ;  $C(0, n_C, 0)$  (рис.2).

Величины  $AB$ ;  $AC$ ;  $BC$ ;  $O_3A$ ;  $O_3B$ ;  $O_3C$ , определяются выражениями:

$$\begin{aligned} AB &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}; \\ AC &= \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2}; \\ BC &= \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2}; \\ O_3A &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}; \\ O_3B &= \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}; \\ O_3C &= \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Переход от системы координат  $O_3XYZ$  к системе  $Apnt$  для простоты происходит в два этапа. Сначала строится система координат  $Ap'n'm'$ , где ось  $n'$  совпадает с осью  $n$ , ось  $p'$  перпендикулярна к оси  $n'$  и направлена в сторону точки  $B$ , ось  $m'$  дополняет систему до правой. При этом треугольник  $ABC$  составляет с плоскостью  $p'An'$  неизвестный угол  $\varphi$ .

Координаты в системе  $Ap'n'm'$ , определяются выражениями:

$$\begin{aligned} p'_i &= s_p \cdot (x_i - x_1) + s_n \cdot (y_i - y_1) + s_m \cdot (z_i - z_1); \\ n'_i &= k_p \cdot (x_i - x_1) + k_n \cdot (y_i - y_1) + k_m \cdot (z_i - z_1); \\ m'_i &= t_p \cdot (x_i - x_1) + t_n \cdot (y_i - y_1) + t_m \cdot (z_i - z_1), \end{aligned} \quad (4)$$

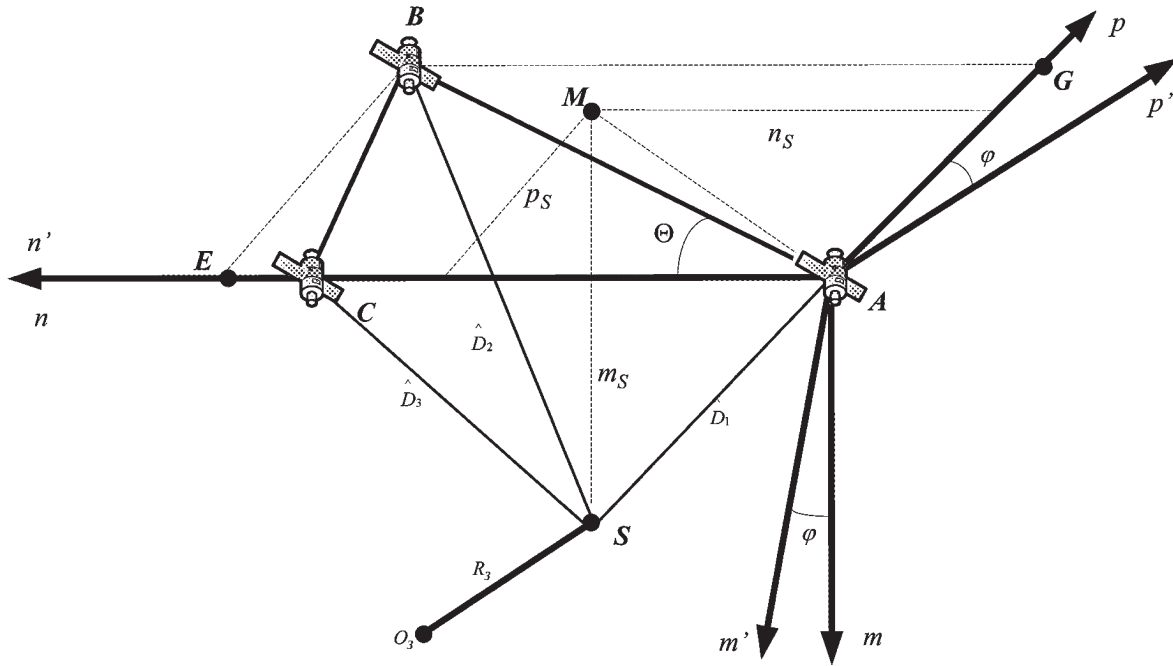


Рис. 2. Геометрическое построение для нахождения радиуса Земли

где  $s_p, s_n, s_m, k_p, k_n, k_m, t_p, t_n, t_m$  – направляющие косинусы осей  $p'n'$  и  $m'$  соответственно;  $i = (1...3)$ .

Направляющие косинусы определяются следующим образом:

$$\begin{cases} k_p = \frac{x_3 - x_1}{AC}; \\ k_n = \frac{y_3 - y_1}{AC}; \\ k_m = \frac{z_3 - z_1}{AC}; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} t_p = -\frac{k_n}{\sqrt{k_p^2 + k_n^2}}; \\ t_n = \frac{k_p}{\sqrt{k_p^2 + k_n^2}}; \\ t_m = 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} s_p = -k_m \cdot t_n; \\ s_n = k_m \cdot t_p; \\ s_m = k_p \cdot t_n - k_n \cdot t_p. \end{cases} \quad (7)$$

Далее, в системе  $Ap'n'm'$  определяется угол  $\varphi$ , и система поворачивается на величину этого угла вокруг оси  $n$

$$\cos \varphi = \frac{p_2}{\sqrt{m_2^2 + p_2^2}} \quad (8)$$

В соответствии с (4) – (8) координаты центра Земли ( $O_3$ ) в системе  $Apnm$  определяются выражениями:

$$\begin{aligned} p_{O_3} &= -(s_p \cos \varphi + t_p \sin \varphi) \cdot x_1 - \\ &-(s_n \cos \varphi + t_n \sin \varphi) \cdot y_1 - (s_m \cos \varphi + t_m \sin \varphi) \cdot z_1; \\ n_{O_3} &= -k_p \cdot x_1 - k_n \cdot y_1 - k_m \cdot z_1; \\ m_{O_3} &= (s_p \sin \varphi - t_p \cos \varphi) \cdot x_1 - \\ &-(t_n \cos \varphi - s_n \sin \varphi) \cdot y_1 - (t_m \cos \varphi - s_m \sin \varphi) \cdot z_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Так как ось  $m$  направлена в сторону поверхности Земли, то координата  $m_{O_3}$  будет положительна.

Далее решается задача нахождения координат точки  $S = [p_s, n_s, m_s]$ . Для этого необходимо из точки  $S$  опустить перпендикуляр  $SM$  на плоскость  $nAp$  (рис.2). Длина отрезка  $SM$  равна величине  $m_s$ , координаты точки  $M$  по осям  $n$  и  $p$  равны координатам  $n_s$  и  $p_s$  соответственно.

Определение координат точки  $S$  происходит в следующей последовательности.

1. Определяется величина отрезков  $BG$  и  $BE$ :  
 $AE = AB \cdot \cos \Theta$ ;  
 $AG = AB \cdot \sin \Theta$ . (10)

2. Последовательно определяются координаты  $n_s$ ,  $p_s$  и  $m_s$

$$n_s = \frac{D_1 - D_3 + AC^2}{2AC}; \quad (11)$$

$$p_s = \frac{AG^2 + AE^2 - 2AE \cdot n_s - D_2 + D_1}{2AG}; \quad (12)$$

$$m_s = \sqrt{D_1 - p_s^2 - n_s^2}. \quad (13)$$

3. Определяется геоцентрическая высота в точке S:  

$$R_3 = \sqrt{(p_s - p_{O_3})^2 + (n_s - n_{O_3})^2 + (m_s - m_{O_3})^2}. \quad (14)$$

Ошибка определения геоцентрической высоты потребителя определяется выражением

$$\Delta R = R_3^{ucm} - R_3, \quad (15)$$

где  $R_3^{ucm}$  – истинная геоцентрическая высота в точке нахождения потребителя.

Согласно (13) координата  $m_s$  может иметь как отрицательное, так и положительное значение. Величина  $m_s$  принимает отрицательное значение в случаях, когда треугольник  $O_3SA$  «разрезает» треугольник ABC. Подобная ситуация представлена на рис.3. Она возникает тогда, когда в выбранной тройке НКА два аппарата имеют низкие ( $5^0 \dots 7^0$ ) углы места. Возникающую неоднозначность можно устранить сравнением полученной величины  $R_3$  с величиной большой полуоси земного эллипсоида  $a_3 = 6378136$  м.

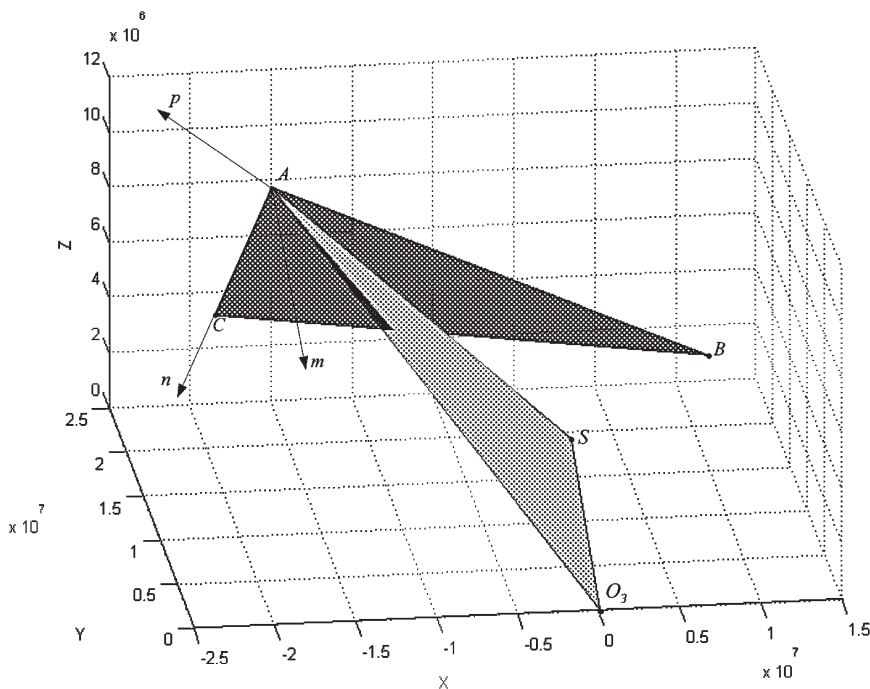


Рис. 3. Случай, когда величина  $m_s$  принимает отрицательное значение

В соответствие с приведенной выше методикой была рассчитана геоцентрическая высота потребителя для  $n = 300$  рабочих созвездий из трех НКА. Ошибка  $\Delta R$  представлена на рис.4.

Анализ рис. 4 показывает, что ошибка определения геоцентрической высоты по сигналам трех НКА для выбранных созвездий не превышает 25м и соответствует требованиям к точности определения псевдодальности в СРНС.

Определив величину  $R_3$  далее решают навигационную задачу известным итерационным методом наименьших квадратов [3, 4], где вектор измеренных значений псевдодальностей имеет вид (2), а матрица координат НКА определяется, как (1). Ошибки позиционирования по высоте ( $\Delta H$ ) и в плане при расчете вектора состояния потребителя с использованием псевдоспутника в центре Земли приведены на рис.5.

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что погрешность позиционирования при использовании методики определения вектора состояния с использованием псевдоспутника в центре Земли и НРС трех НКА не превышает 30м в плане и по высоте, то есть соответствует требованиям, предъявляемым к точности позиционирования в СРНС

### Заключение

Для решения навигационной задачи по сигналам трех НКА необходимо знание геоцентрической высоты

точки нахождения потребителя. Погрешность определения этой величины по сигналам трех НКА зависит от точности измерений псевдодальностей до этих НКА и геометрического расположения НКА относительно потребителя.

Использование методики решения навигационной задачи по сигналам трех НКА требует модификации НАП. Помимо известных функций, обеспечивающих работу в штатном режиме, НАП должна определять НКА,

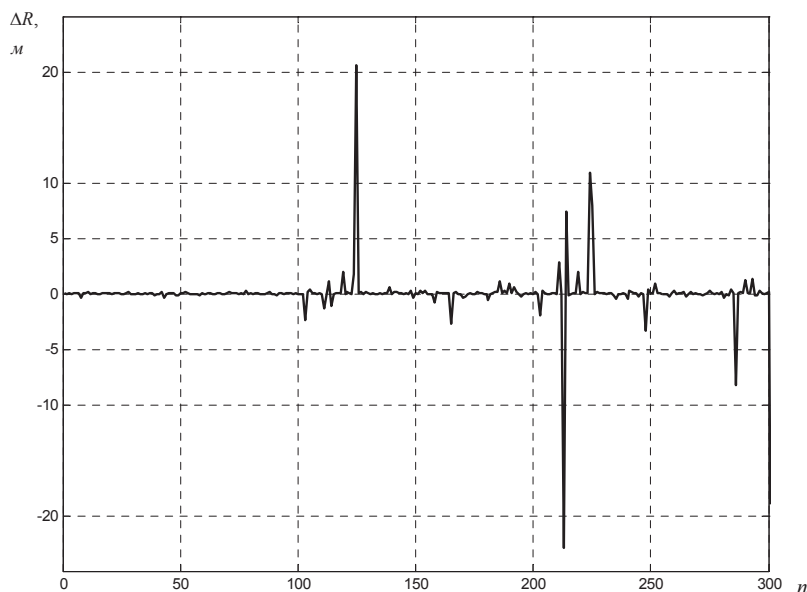


Рис. 4. Ошибка определения геоцентрической высоты потребителя

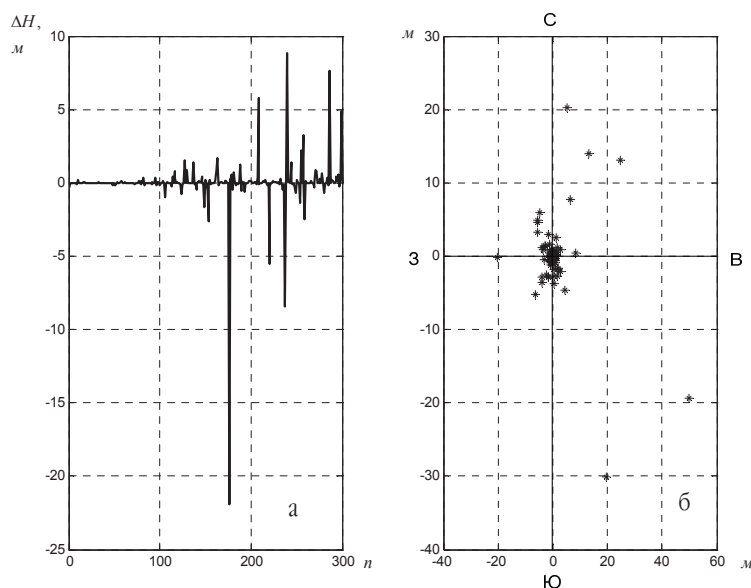


Рис. 5. Ошибки позиционирования при использовании псевдоспутника в центре Земли:  
а – ошибка по высоте; б – ошибка в плане

сигнал которого подвергается ЧСЗ.

В случае возникновения ИВИ, когда НАП принимает без замираний радиосигналы только трех НКА, исполь-

зование вместо 4-го НКА псевдоспутника в центре Земли позволяет определить вектор состояния потребителя с погрешностями, соответствующими требованиям точности.

*Литература*

1. Пашищев В.П., Солчатов М.А., Спиринов А.М., Катков К.А. Оценка погрешности измерения псевдодальности в спутниковых радионавигационных системах при возмущениях ионосферы в слое F. // Физика волновых процессов, 2007 – Том 10 – №6 – с. 8 – 13.
2. Катков К.А. Определение погрешности позиционирования в одночастотной навигационной аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем при возникновении частотно-селективных замираний навигационных радиосигналов // Информационные системы и технологии, 2009 – № 3/53(564) – с. 80 – 88.
3. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы – М.: Радио и связь, 1993. –408 с.
4. Харисов В.Н., Перова А.И., Болдина В.А. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС, М.: ИПРЖР, 1998 – 400с.

Материал поступил в редакцию 10. 08. 2009 г.