

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Приведены результаты разработки и экспериментальных исследований алгоритма определения угловой ориентации объектов по сигналам спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Выполнена оценка вероятности правильного разрешения неоднозначности при определении угловой ориентации переборным методом с выбором оптимальной комбинации целочисленных неоднозначностей по критерию максимального правдоподобия.

Введение

Определение пространственной ориентации по результатам измерений параметров сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС/GPS, принятых разнесенными в пространстве антеннами, является одним из перспективных направлений расширения функциональных возможностей навигационной аппаратуры потребителей (НАП) [1]. Используя информацию о пространственной ориентации, можно определить координаты любой заданной точки объекта, в которой невозможна установка приемной антенны НАП, например при определении положения ковша экскаватора или положения черпакового барабана золотодобывающей драги, находящегося под водой [2, 3]. В железнодорожном транспорте возможно определение уклона продольного профиля пути или взаимного положения рельсовых нитей по высоте (уровень) [4, 5].

Кроме расширения возможностей использования НАП режим определения пространственной ориентации обеспечивает наиболее эффективное комплексирование НАП с инерциальными измерительными модулями. Такое комплексирование обеспечивает повышение помехозащищенности НАП и точности определения радионавигационных параметров за счет сужения полосы пропускания следящих измерителей. Кроме того, использование ИИМ позволяет не прекращать формирование навигационных отсчетов при перерывах в приеме сигналов НКА, обусловленных воздействием помех и/или затенениями от местных предметов, а также оперативно восстанавливать слежение за сигналами НКА после перерывов в их приеме [6].

В настоящее время известны два радиотехнических метода измерения направлений: амплитудный и фазовый (интерферометрический) [7]. Анализ публикаций в технической литературе и рекламных материалов [8–11] показывает, что практически вся выпускаемая НАП СРНС, выполняющая определение ори-

Алешечкин Андрей Михайлович. Доктор технических наук, профессор Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск). Действительный член Академии навигации и управления движением.

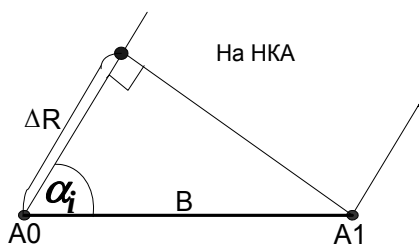
Статья по докладу на XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

ентации объектов, использует интерферометрический метод измерений. Применение этого метода требует наличия на борту объекта нескольких пространственно разнесенных антенн, принимающих сигналы НКА. На основании измерений фазовых сдвигов (ФС) сигналов НКА, принятых разнесенными антеннами, пользователь оценивает ориентацию базовой линии, соединяющей приемные антенны НАП, а по ней – свою собственную ориентацию.

Представленная статья посвящена разработке и экспериментальным исследованиям алгоритма определения угловой ориентации по одночастотным измерениям СРНС с разрешением неоднозначности фазовых измерений переборным методом. При разработке алгоритмов определения угловой ориентации полагалось, что разнесенные на некоторое расстояние антенны подключены к одному комплексу специализированной НАП, позволяющей формировать измерения от нескольких антенн с использованием одного опорного генератора. В качестве примера аппаратуры такого типа можно привести НАП МРК-11 [12] и МРК-32 [13], разработанную ФГУП НПП «Радиосвязь» совместно с ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Исходные уравнения при определении угловой ориентации интерферометрическим методом

При определении ориентации с использованием СРНС измеряемыми параметрами являются углы между осями объекта и векторами-направлениями на каждый из НКА [14 – 20]. Координаты НКА и объекта считаются известными, следовательно, можно найти угол α_i между базовой линией, расположенной параллельно одной из осей объекта, и направлением i -й НКА (рис. 1). При этом расстояние B между антеннами может быть либо известным, либо не известным.



Как показано в [16], фазовый сдвиг (ФС) сигнала i -го НКА, принимаемого двумя антеннами объекта, и косинус угла α_i между вектором-базой и вектором-направлением на НКА связаны между собой выражением

$$\cos \alpha_i = \frac{\lambda_i \Phi_i}{2\pi B}, \quad (1)$$

Рис. 1. Определение ориентации объекта интерферометрическим методом

где $i = 1, \dots, n$; n – общее число НКА, используемых для определения угловой ориентации объекта; λ_i – длина волны сигнала i -го

НКА; Φ_i – ФС сигнала i -го НКА, принятого двумя пространственно разнесенными антеннами объекта; B – расстояние между антеннами.

Вычисление направляющих косинусов вектора-базы осуществляется на основе уравнения, полученного исходя из правила вычисления скалярного произведения векторов в декартовой системе координат

$$k_{xi} \cdot X + k_{yi} \cdot Y + k_{zi} \cdot Z = \frac{\lambda_i \Phi_i}{2\pi B}, \quad (2)$$

где $k_{xi} = \frac{x_{ci} - x}{R_i}$, $k_{yi} = \frac{y_{ci} - y}{R_i}$, $k_{zi} = \frac{z_{ci} - z}{R_i}$ – направляющие косинусы векторов-направлений от объекта до НКА; x, y, z – координаты объекта в геоцентриче-

ской системе координат (ГЦСК); x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} – координаты i -го НКА в ГЦСК, получаемые в процессе решения навигационно-временной задачи; $R_i = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2}$ – расстояние между объектом и i -м НКА, вычисляемое по их известным координатам; X, Y, Z – неизвестные направляющие косинусы вектора-базы, соединяющей пространственно разнесенные антенны объекта;

Систему (2) можно дополнить нелинейным уравнением связи между направляющими косинусами [16, 17], имеющим вид

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = 1. \quad (3)$$

Таким образом, система уравнений, для определения угловой ориентации при известном расстоянии между антеннами объекта имеет вид:

$$\begin{cases} k_{xi}X + k_{yi}Y + k_{zi}Z = \frac{\lambda_i \Phi_i}{2\pi B}; \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1. \end{cases} \quad (4)$$

При определении ориентации объекта часто неизвестными являются не только направляющие косинусы вектора-базы, но и расстояние B между антеннами [19]. Оценка расстояния между антеннами может потребоваться, например, при калибровке антенной системы, проводимой на этапе настройки НАП, а также при установке антенн на объект, в том случае если антенны не монтируются на общую калиброванную антенную платформу.

Следует отметить, что определение ориентации линии, соединяющей две приемные антенны с одновременной оценкой расстояния между ними, по сути, представляет собой задачу относительной навигации, состоящей в определении координат подвижного приемника по отношению к неподвижному приемнику. Отличие состоит в том, что в рассматриваемом здесь случае определения угловой ориентации измерения фазовых сдвигов формируются от общего опорного генератора, в то время как при относительной навигации следует учитывать работу двух приемников с разными опорными генераторами.

Выполнив замену переменных в (4), можно получить систему уравнений для определения угловой ориентации в случае неизвестного расстояния между антеннами объекта, которая имеет вид:

$$\begin{cases} k_{xi}X^* + k_{yi}Y^* + k_{zi}Z^* = \frac{\lambda_i \Phi_i}{2\pi}; \\ X^{*2} + Y^{*2} + Z^{*2} = B^2, \end{cases} \quad (5)$$

где $X^* = B \cdot X$, $Y^* = B \cdot Y$, $Z^* = B \cdot Z$ – координаты антенны А1 по отношению к антенне А0.

В [17 – 20] исследованы методы решения систем уравнений (4) и (5) для случаев минимального и избыточного созвездий НКА, а также показано влияние взаимного расположения спутников и объекта на точность определения его ориентации.

Однако определение ориентации объекта путем прямого решения систем (4) и (5) на практике возможно, только если расстояние между антеннами не превышает половины длины волны принятых сигналов λ_i . Лишь в этом случае

значения измеренных ФС принятых сигналов φ_i равны полным фазовым сдвигам сигналов Φ_i , пропорциональным разности хода сигналов, принимаемых двумя антеннами НАП.

Исходя из этого, при расстоянии между антеннами B , превышающем половину длины волны, требуется решение задачи разрешения неоднозначности фазовых измерений, т.е. определение целого числа периодов измеренных фаз [14, 15, 21–23].

Определение угловой ориентации при наличии неоднозначности и систематической погрешности фазовых измерений

Как было указано выше, для повышения точности при определении ориентации объектов используют НАП с расстоянием между антеннами B , превышающим длину волны принимаемых сигналов. Например, длина волны сигналов СРНС ГЛОНАСС составляет около 20 см, а расстояние между антеннами может составлять 2 м и более. Существующие фазометры имеют диапазон однозначных измерений 180 или 360°, т.е. $\lambda/2$ или λ . Кроме того, при измерениях ФС возникают аппаратные систематические погрешности, обусловленные разным временем прохождения принятых сигналов в антенных каналах НАП.

В связи с этим выражение для полных ФС принятых сигналов можно записать в виде [21]

$$\Phi_i = 2\pi k_i + \Delta\varphi_{ci} + \varphi_i, \quad (6)$$

где k_i – число целых циклов неоднозначности 360° в полном ФС сигнала i -го НКА; $\Delta\varphi_{ci}$ – не зависящая от времени аппаратная систематическая погрешность измерения фазового сдвига сигнала i -го НКА; φ_i – измеренное значение ФС сигнала i -го НКА, принятого двумя пространственно разнесенными антеннами объекта.

Систематическая погрешность измерения фазового сдвига может быть определена путем калибровки аппаратуры или путем включения ее в число неизвестных параметров системы уравнений для определения угловой ориентации [21]. В связи с этим в дальнейших материалах статьи значения $\Delta\varphi_{ci}$ полагаются равными нулю.

С учетом наличия неоднозначности система уравнений (4), записанная для известного расстояния между антеннами, примет вид:

$$\begin{cases} k_{xi}X + k_{yi}Y + k_{zi}Z = \frac{\lambda_i(2\pi k_i + \varphi_i)}{2\pi B}; \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

В случае если расстояние между антеннами НАП неизвестно, система уравнений (5) запишется аналогично:

$$\begin{cases} k_{xi}X^* + k_{yi}Y^* + k_{zi}Z^* = \frac{\lambda_i(2\pi k_i + \varphi_i)}{2\pi}; \\ X^{*2} + Y^{*2} + Z^{*2} = B^2. \end{cases} \quad (8)$$

При определении ориентации объекта обычно известны лишь значения измеренных ФС несущих частот сигналов, принятых НАП, обозначаемые, как φ_i в вышеприведенных уравнениях. Значения целочисленной неоднозначности k_i неизвестны и должны быть определены вместе с неизвестными относительными координатами дополнительной антенны X^*, Y^*, Z^* , либо их следует исключить из уравнений.

Решению задачи разрешения фазовой неоднозначности посвящено большое число научных работ, в том числе [22, 23, 26, 28] обзор методов устранения неоднозначности содержится в [15].

Представляют интерес алгоритмы прямого поиска неоднозначностей путем перебора всех возможных значений комбинаций неоднозначностей $k_1, \dots, k_n$ для всех принимаемых НКА, приведенные в [22, 23]. Данные алгоритмы основаны на восстановлении полных ФС $\Phi_1, \dots, \Phi_n$ из измеренных ФС $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ путем добавления к ним значений целочисленных неоднозначностей, кратных одному фазовому циклу, или 360° .

Поскольку угловая ориентация линии, соединяющей приемные антенны НАП, неизвестна, значения разностей хода принятых сигналов могут находиться в пределах $\pm B$, чему соответствует диапазон значений целочисленной неоднозначности $N_{\max}$

$$N_{\max} = \pm \text{int} \left(\frac{B}{\lambda} + 0,5 \right), \quad (9)$$

где B – расстояние между антеннами; λ – длина волны принятых сигналов; $\text{int}(\cdot)$ означает операцию выделения целой части числа.

Следует отметить, что данный метод разрешения фазовой неоднозначности является одномоментным, т.е. для получения решения в принципе достаточно проведения одного измерения ФС для сигналов n НКА. К недостаткам метода следует отнести достаточно высокие требования к вычислительным ресурсам процессора вторичной обработки навигационной информации, решающего задачу определения углового положения, а также возможность возникновения грубых погрешностей, обусловленных ошибочным определением значений неоднозначностей k_i .

Из (9) следует, что при восстановлении полных фазовых сдвигов Φ_i по измеренным значениям φ_i необходимо перебрать $[2 \cdot N_{\max} + 1]^n$ комбинаций их неоднозначностей. Например, при расстоянии между антеннами $B=1$ м величина $N_{\max} = 5$, что при работе по сигналам 4 НКА приведет к необходимости анализа $11^4 = 14641$ решений, а при работе по 8 НКА число решений составит $11^8 \cong 2 \cdot 10^8$ [26].

В связи с этим требуется модернизация переборного алгоритма определения углового положения в целях уменьшения числа возможных решений и сокращения времени вычислений.

Для уменьшения числа анализируемых решений может быть использован способ нахождения начального набора возможных решений по минимальному числу НКА, необходимых для решения задачи определения угловой ориентации [22].

Решение системы уравнений по минимальной группировке из двух НКА

Система уравнений при известном расстоянии между антеннами B содержит 3 неизвестных – X , Y , Z . Следовательно, с использованием нелинейного уравнения связи для решения задачи определения углового положения достаточно всего двух НКА. Система уравнений (7) для этого случая примет вид:

$$\begin{cases} k_{x1} \cdot X + k_{y1} \cdot Y + k_{z1} \cdot Z = \Phi_1; \\ k_{x2} \cdot X + k_{y2} \cdot Y + k_{z2} \cdot Z = \Phi_2; \\ \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = 1, \end{cases} \quad (10)$$

где $\Phi_i = \frac{\lambda_i \cdot (2\pi k_i + \varphi_i)}{2\pi B}$, $i = 1, 2$.

По найденным в результате решения системы уравнений (10) значениям направляющих косинусов в ГЦСК (X , Y , Z) по известным выражениям осуществляется переход в топоцентрическую систему координат, в результате чего получают значения направляющих косинусов $\cos\beta_{xT}$, $\cos\beta_{yT}$ и $\cos\beta_{zT}$. После этого полученные значения используют для вычисления азимута Ψ_a и угла места $\Psi_{ум}$ антенной системы объекта.

Схематически процесс перехода от параметров X, Y, Z к значениям Ψ_a и $\Psi_{ум}$ можно представить в виде

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \cos\beta_{xT} \\ \cos\beta_{yT} \\ \cos\beta_{zT} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \Psi_a \\ \Psi_{ум} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Решение системы уравнений по минимальной группировке из трех НКА

Рассмотренное решение по минимальной группировке из двух НКА требует точного знания расстояния между антеннами интерферометра B . В случае если расстояние между антеннами B заранее неизвестно с требуемой точностью, для нахождения углового положения базы требуется принять сигналы трех НКА.

При этом в системе уравнений (8) используются только линейные уравнения системы, по которым находят значения X^*, Y^*, Z^* . Нелинейное уравнение системы служит для уточнения расстояния между антеннами B .

В результате решения системы уравнений по трем НКА получают значения относительных координат фазового центра второй антенны X^*, Y^*, Z^* , заданных в ГЦСК. Далее осуществляют переход к значениям направляющих косинусов вектора-базы X, Y, Z , затем, аналогично случаю двух НКА, – переход к значениям азимута Ψ_a и угла места $\Psi_{ум}$ в последовательности (11).

Следует отметить, что в случае, если расстояние между антеннами будет известным, система уравнений по начальной группировке из трех НКА будет иметь вид, аналогичный системе (10):

$$\begin{cases} k_{x1} \cdot X + k_{y1} \cdot Y + k_{z1} \cdot Z = \Phi_1; \\ k_{x2} \cdot X + k_{y2} \cdot Y + k_{z2} \cdot Z = \Phi_2; \\ k_{x3} \cdot X + k_{y3} \cdot Y + k_{z3} \cdot Z = \Phi_3; \\ \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = 1. \end{cases} \quad (12)$$

Данная система уравнений в отличие от (10) дает одно решение, поскольку перед началом итераций начальные значения направляющих косинусов X, Y, Z однозначно определяются решением линейных уравнений системы (12).

Реализация алгоритма

Приведенные в [25] результаты расчетов показывают, что погрешность определения угловой ориентации зависит от числа принимаемых НКА n , взаимного расположения потребителя и принимаемых НКА и собственной ориентации антенн угломерной НАП. Например, при расстоянии между антеннами интерферометра $B = 0,5$ м и среднеквадратической погрешности измерения ФС, равной $3,6^\circ$, может быть достигнута погрешность измерения углового положения на уровне $0,1 - 0,3^\circ$.

Для многих потребителей указанное значение погрешности определения угловой ориентации вполне приемлемо, а небольшое расстояние между антеннами упрощает изготовление антенной системы НАП и ее размещение на подвижном объекте.

В соответствии с (9) для $B = 0,5$ м $N_{\max} = 3$, следовательно, число возможных неоднозначностей для одного НКА составляет $2 \cdot N_{\max} + 1 = 7$.

Таким образом, при работе по минимальному созвездию из двух НКА при $B = 0,5$ м будет получено $7^2 = 49$ потенциальных решений для углового положения антенн интерферометра. С учетом того, что система уравнений (10) является нелинейной, для каждого вектора неоднозначностей в результате решения системы будет получено по 2 равноправных угловых положения, т.е. общее число анализируемых решений составит 98. При работе по минимальному созвездию из трех НКА число потенциальных решений составит $7^3 = 343$.

Полученные значения решений для всех векторов неоднозначностей проверяются на соответствие априорно известным значениям азимута и угла места объекта и расстояния между антеннами, если таковые имеются. Априорные значения азимута и угла места объекта получают от имеющихся на борту объекта данных от внешних датчиков курса и качки (гироскопов, инерциальных навигационных систем). При отсутствии внешних датчиков априорные данные могут быть получены исходя из специфики движения объекта (использование направления вектора скорости, линии железнодорожного пути и положения поезда на нем – для железнодорожных объектов, ограничений по углу места – для наземных объектов и т.д.).

Затем для каждого из оставшихся m решений по угловому положению объекта вычисляют значения неоднозначностей для остальных НКА, по которым в данный момент проводятся измерения ФС φ_i

$$k_{ij} = \left[\frac{1}{\lambda_i} \cdot (k_{xi} \cdot X_j + k_{yi} \cdot Y_j + k_{zi} \cdot Z_j) - \varphi_i + 0,5 \right], \quad (13)$$

где $i=3, \dots, n$ – номер НКА для вычислений; n – общее число НКА; $j=1, \dots, m$ – номер имеющегося решения; m – общее число оставшихся решений; X_j, Y_j, Z_j – направляющие косинусы вектора-базы для j -го решения; λ_i – длина волны сигнала i -го НКА; k_{ij} – значение вектора неоднозначности для i -го НКА, полученное для j -го решения.

Используя вычисленные значения неоднозначностей k_{ij} , находят угловое положение вектора-базы по n НКА X_{nj}, Y_{nj}, Z_{nj} . По полученным значениям для каждого решения определяют сумму квадратов невязок Q_j левой и правой частей линейных уравнений системы (10) для всех НКА по формуле

$$Q_j = \sum_{i=1}^n \left(kx_i \cdot X_{nj} + ky_i \cdot Y_{nj} + kz_i \cdot Z_{nj} - \frac{\lambda_i \cdot (\varphi_i + 2\pi \cdot k_{ij})}{2\pi \cdot B} \right)^2. \quad (14)$$

Можно показать, что для равноточных измерений при нормальном законе распределения погрешностей измерений ФС решение, приводящее Q_j в минимум, является максимально правдоподобным [26, 27], характеризующим угловое положение антенной системы интерферометра.

В целях повышения вероятности правильного разрешения неоднозначности процедура выбора одного решения из набора потенциальных может осуществляться по результатам нескольких одновременных измерений, т.е. по сути это будет фильтрация измерений во времени. При этом значения сумм квадратов невязок Q_j для каждого из проверяемых решений накапливаются во времени.

Отбраковка ложных решений с помощью фильтрации основана на том, что малая величина невязки ложного решения обусловлена множеством случайных факторов, зависящих от расположения НКА и ориентации объекта в пространстве. С течением времени эти условия нарушаются – за счет движения НКА и объекта, в результате невязка ложного решения возрастает по сравнению с истинным решением, что является основой для отбраковки ложных решений [28, 29].

Исходные данные при моделировании

Оценка вероятности правильного разрешения неоднозначности осуществлялась методом статистического моделирования при следующих исходных данных:

- число антенн интерферометра – 2, образующих одну базу;
- ориентация антенной системы:
 - по азимуту: $0 - 360^\circ$ с шагом 1° ;
 - по углу места 0° ;
- расстояние между антеннами интерферометра $B = 0,5$ м;
- среднеквадратическое отклонение погрешности измеренных значений фазовых сдвигов сигналов НКА $\sigma_\varphi = 7,2^\circ$;
- число НКА, по которым проводились измерения, 4, 8, 12;
- максимально допустимое отклонение получаемых решений от априорных данных:
 - по расстоянию между антеннами интерферометра 0.1 м;

- по углу места 30° ;
- координаты объекта: 55° сев. шир., 92° вост. долг.;
- расположение НКА при моделировании соответствует данным табл. 1, где приведены значения азимута Θ_a и угла места $\Theta_{ум}$ НКА, заданные в местной системе координат.

На

рис. 2 показано расположение НКА, принятое при моделировании в соответствии с данными табл. 1.

Таблица 1

Значения азимута и угла места НКА, заданные при моделировании

№ НКА	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Theta_a, ^\circ$	270	16	154	45	254	192	140	280	175	220	90	0
$\Theta_{ум}, ^\circ$	85	78	75	60	50	48	40	20	20	16	10	10

График построен в полярных координатах, центр окружности соответствует углу места НКА $\Theta_{ум}$, равному 90° , край – углу места 0° . Угол от оси абсцисс соответствует азимутальному углу НКА Θ_a , выраженному в градусах. Цифры на графике соответствуют номеру НКА в табл. 1.

Расположение НКА в порядке убывания угла места необходимо при работе в реальных условиях, поскольку НКА с большим углом возвышения менее подвержены затенению местными предметами, имеют больший уровень принимаемых сигналов и, как следствие, меньшие значения погрешностей измеренных фазовых сдвигов. Начальное созвездие, предназначенное для поиска потенциальных решений по угловому положению вектора-базы, формируется в последовательности, указанной в табл. 1.

Таким образом, при работе по начальному созвездию из 2 НКА в него войдут НКА с номерами 1 и 2, а при работе по начальному созвездию из 3 НКА – НКА с номерами 1, 2, 3.

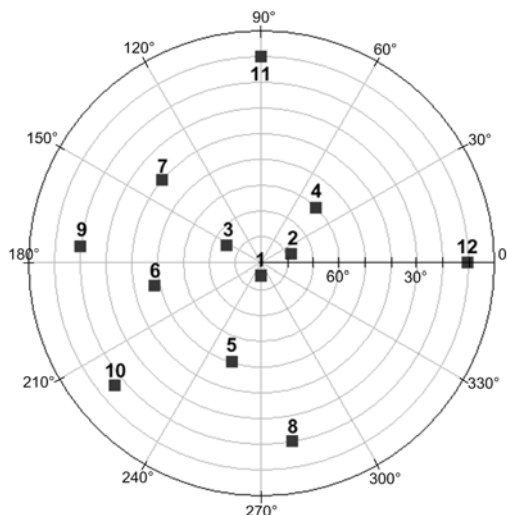


Рис. 2. Расположение НКА, заданное при моделировании

При проведении моделирования погрешности измерения ФС задавались в виде нормально распределенных случайных величин с нулевым математическим ожиданием и заданным среднеквадратическим отклонением σ_φ .

Расчет вероятности правильного разрешения неоднозначности для начального созвездия из 2 НКА

Оценка вероятности правильного разрешения неоднозначности осуществлялась методом статистического моделирования путем формирования измеренных значений ФС и ввода в них погрешностей, характеризуемых заданными значениями среднеквадратических погрешностей σ_φ . При этом при проведении статистических испытаний движение НКА не учитывалось, т.е. измерения фазовых сдвигов полагались относящимися к одному моменту времени.

Измеренные ФС формировались на основе заданных значений азимута Ψ_{a0} и угла места Ψ_{y0} антенной платформы. На основе результатов измерений ФС в соответствии с алгоритмом вычислялись значения азимута Ψ_a и угла места Ψ_{ym} антенной системы объекта, а также неоднозначности k_i для всех НКА. Полученные неоднозначности k_i сравнивались с известными значениями, рассчитанными в процессе формирования ФС. При совпадении заданного и вычисленного векторов неоднозначности полагалось, что неоднозначность устранена правильно.

В результате проведения 500 измерений в каждой точке, характеризующей заданными значениями азимута Ψ_{a0} и угла места Ψ_{y0} , вычислялась оценка вероятности правильного разрешения неоднозначности $P_{пр}$ по формуле

$$P_{пр} = n_c / 500, \quad (15)$$

где n_c – число совпадений вычисленного и заданного векторов неоднозначностей для НКА, используемых в расчетах.

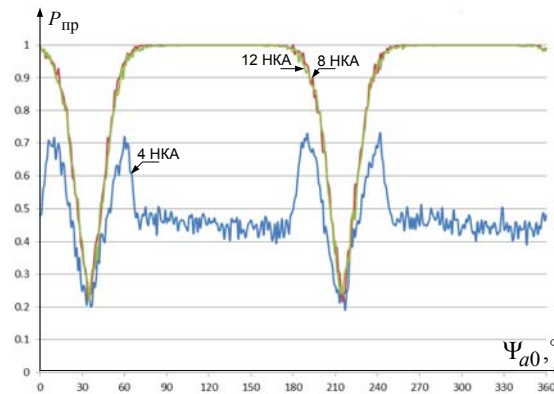


Рис. 3. Вероятность правильного разрешения неоднозначности для начального созвездия из 2 НКА

На рис. 3 приведены зависимости вероятности правильного разрешения неоднозначности от азимута антенн объекта при решении задачи разрешения неоднозначности по созвездию из 4, 8 и 12 НКА для среднеквадратической погрешности измерения ФС $\sigma_\varphi = 7.2^\circ$ при угле места антенной системы $\Psi_{y0} = 0^\circ$.

На данных графиках приведены зависимости $P_{\text{пр}}$ (ось ординат) от заданного угла азимута антенной системы Ψ_{a0} (ось абсцисс), находящегося в пределах $0-360^\circ$ с шагом 1° . Графики приведены для разного числа НКА, используемых для решения задачи. Так, для созвездия из 4 НКА используются НКА с номерами 1–4 (см. табл. 1), для 8 НКА – с номерами 1-8, для 12 НКА – все спутники.

Из рисунка видно, что вероятность правильного разрешения неоднозначности зависит от азимута антенной системы, причем минимумы вероятности наблюдаются при азимутах, соответствующих направлению прямой, проведенной через НКА начального созвездия. Данный эффект объясняется тем, что в этом случае система уравнений для определения угловой ориентации по минимальному созвездию НКА является плохо обусловленной и дает большую погрешность. Это приводит к тому, что при расчете по формуле (13) неоднозначности для избыточных НКА, не входящих в начальное созвездие, может быть получено значение, отличающееся от истинного, что приводит к ошибочному разрешению неоднозначности и получению неверного значения ориентации.

Расчет вероятности для начального созвездия из трех НКА

Были проведены исследования алгоритма определения угловой ориентации при поиске потенциальных решений по начальному созвездию, состоящему из трех НКА. Остальные исходные данные, использованные при моделировании, соответствовали работе по начальному созвездию из двух НКА.

Оценка вероятности правильного разрешения неоднозначности осуществлялась по результатам 100 статистических испытаний для каждой точки, характеризующей заданными значениями азимута Ψ_{a0} и угла места $\Psi_{\text{ум}0}$.

Полученные значения вероятности правильного разрешения неоднозначности приведены на рис. 4 для случая решения системы уравнений (8) с неизвестной базой.

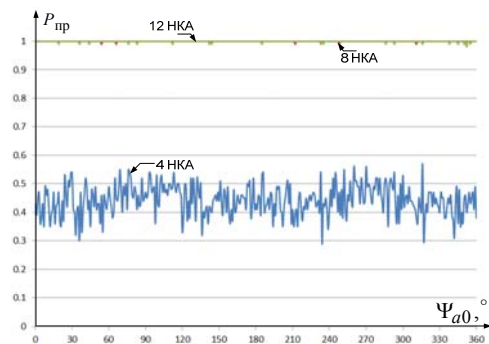


Рис. 4. Вероятность правильного разрешения для решения с неизвестным расстоянием между антеннами B

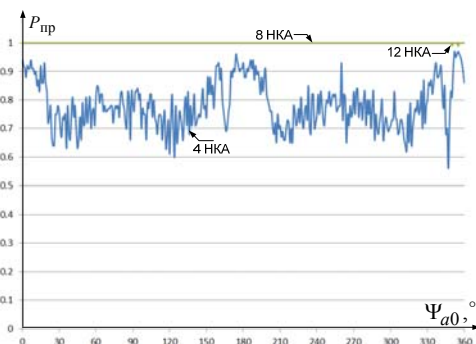


Рис. 5. Вероятность правильного разрешения неоднозначности при решении с известным расстоянием между антеннами B

Кроме того, на рис. 5 приведены результаты расчета вероятности правильного разрешения неоднозначности при решении системы уравнений (12), составленной для начального созвездия из трех НКА с учетом известного значения расстояния между антеннами.

Представленные результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Решение задачи по начальному созвездию из 3 НКА обеспечивает повышение вероятности правильного разрешения неоднозначности и уменьшение ее зависимости от угловой ориентации вектора-базы по сравнению с методом определения угловой ориентации по начальному созвездию из 2 НКА. При этом не происходит снижения вероятности правильного разрешения неоднозначности при значениях азимута 35 и 215°. Это объясняется тем, что решение задачи определения начального набора решений осуществляется путем решения системы линейных уравнений, составленной по трем НКА. Данное условие позволяет уменьшить зависимость чувствительности системы уравнений от взаимной геометрии расположения НКА и базы интерферометра, т.е. обеспечить высокую вероятность разрешения фазовой неоднозначности во всем исследуемом диапазоне ориентаций вектора-базы.

2. Сравнение методов решения задачи с известной и неизвестной величиной базы по начальному созвездию из трех НКА, свидетельствует о том, что учет величины расстояния между антеннами B приводит к повышению вероятности правильного разрешения неоднозначности. Это объясняется повышением точности нахождения начальных решений по минимальному созвездию, а значит, снижением вероятности ошибок при вычислениях согласно выражению (13) целочисленных неоднозначностей k_{ij} для НКА, не входящих в начальное созвездие.

В связи с вышесказанным при решении задачи определения угловой ориентации переборным методом целесообразно использование начального созвездия из трех НКА. Некоторое увеличение времени вычисления и проверки набора потенциальных решений на современном уровне быстродействия элементной базы не представляется существенным.

Результаты экспериментальных исследований разработанного алгоритма

Экспериментальные исследования разработанного алгоритма проводились с использованием аппаратуры МРК-32 [13], серийно выпускаемой ФГУП «НПП «Радиосвязь». На рис. 6, а приведен внешний вид антенной системы аппаратуры, размещенной на крыше Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета.

а)



б)

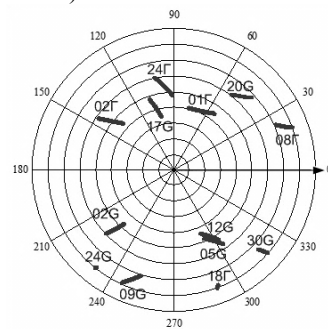


Рис. 6. Антенная система аппаратуры МРК-32 (а);
расположение НКА во время проведения эксперимента (б)

Антенна 1 является общей для обеих баз, образованных антеннами 2 и 3, т.е. первая база образована антеннами 1 и 2, вторая – 1 и 3. Поскольку конек крыши учебного корпуса расположен примерно в направлении запад – восток, то ори-

ентировочное значение азимутов баз, исходя из приведенной установки, составляет для первой базы 180° , для второй базы – 120° . На рис. 6, б приведено расположение НКА, наблюдаемых во время проведения эксперимента. Во время работы аппаратура принимала сигналы 13 НКА, из них 5 относились к системе ГЛОНАСС (на рисунке указаны их системные номера с индексами «Г» – 01, 02, 08, 18, 24), а 8 – к GPS (индексы «G»). Цифрами на рис. 6, б обозначены системные номера НКА (ГЛОНАСС) и номера кодовых последовательностей спутников (GPS).

На рис. 7 приведены значения азимутов, углов места и расстояний между антеннами интерферометра для баз 1-2 и 1-3, вычисленные путем использования предложенного алгоритма определения угловой ориентации по начальному созвездию, состоящему из трех НКА в случае с неизвестным расстоянием между антеннами B .

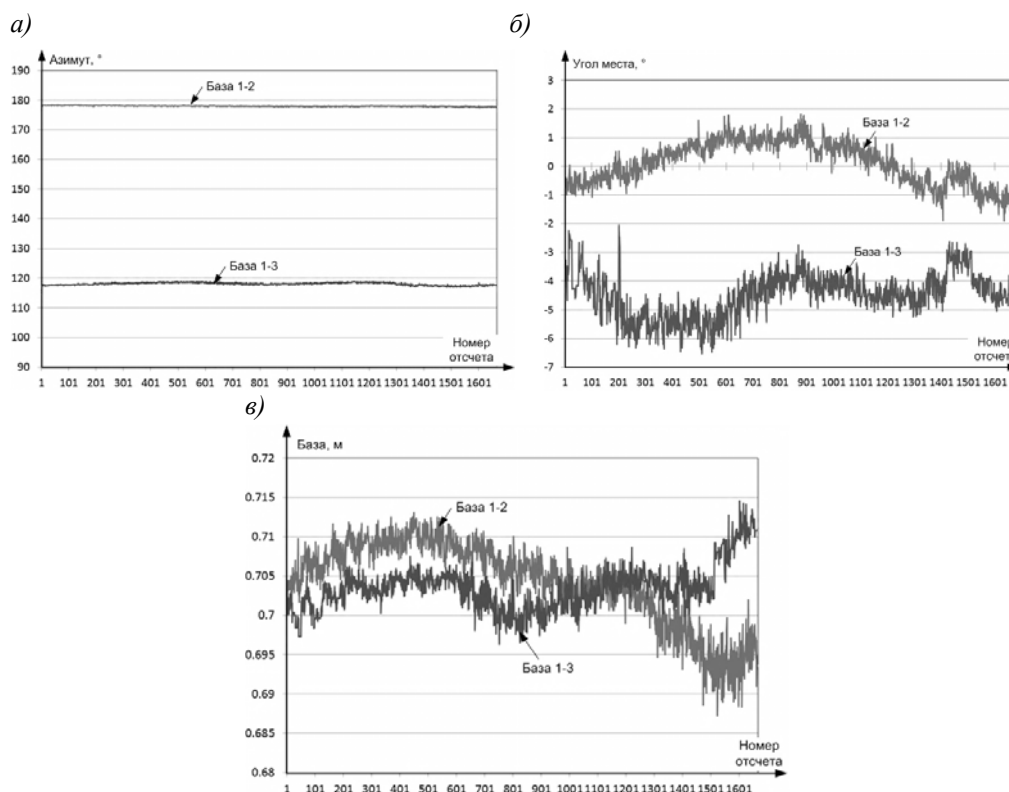


Рис. 7. Измеренные значения, полученные в ходе эксперимента: азимутов (а), углов места (б), расстояния между антеннами (в)

В табл. 2 приведены значения среднеквадратических отклонений (СКО) погрешностей определения азимута, угла места и расстояния между антеннами интерферометра.

Т а б л и ц а 2

Погрешности определения параметров антенной системы

Параметр	База для антенн 1 – 2	База для антенн 1 – 3
СКО определения азимута	11 угл. мин	28 угл. мин
СКО определения угла места	45 угл. мин	46 угл. мин
СКО определения базы, см	0,53	0,29

Таким образом, результаты экспериментальных исследований разработанного алгоритма определения угловой ориентации соответствуют реально наблюдаемой ориентации антенной системы и расстоянию между антеннами B интерферометра.

Заключение

Разработан алгоритм определения угловой ориентации объектов по сигналам спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Данный алгоритм предназначен для определения угловой ориентации двухантенного интерферометра и основан на поиске потенциальных решений по начальному созвездию из 2 или 3 НКА. Далее полученные потенциальные решения используются для расчета неоднозначностей для НКА, не вошедших в начальное созвездие, с последующей проверкой полученных решений по всем принимаемым сигналам НКА и выбором решения, соответствующего максимуму функции правдоподобия.

Выполнены расчеты вероятности правильного разрешения неоднозначности для разработанного алгоритма, которые показывают, что использование в начальном созвездии 3 НКА вместо 2 обеспечивает повышение вероятности правильного разрешения неоднозначности и уменьшение зависимости этой вероятности от ориентации антенн объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шебшаевич, В.С.** Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, [и др.] / Под ред. В.С. Шебшаевича. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь. - 1993. - 408 с.: ил.
2. **Пат. РФ №2152049.** Устройство для определения координат исполнительного механизма надводного объекта / А.М. Алешечкин, В.И. Кокорин // Оpubл.: 2000. - Бюл. №18.
3. **Алешечкин, А.М.** Использование спутниковых навигационных систем при разработке россыпей драгами / А.М. Алешечкин, В.И. Кокорин // М.: Маркшейдерский вестник. - 1996. - №2. - С. 20-22.
4. **Пат. РФ №2115140.** Способ контроля положения подвижных объектов, например, подвижных железнодорожных составов и система для его осуществления / В.И. Болдырев, А.И. Васекин, В.И. Кокорин и др. // Оpubл.: 1998. - Бюл. №19.
5. **Алешечкин, А.М.** Применение спутниковых навигационных систем для энергосбережения на железнодорожном транспорте / А.М. Алешечкин, Е.А. Васекин, В.И. Кокорин // Тез. докл. межд. конф. «Энергосберегающие технологии и окружающая среда». - Иркутск, 2004.
6. **Интегрированная инерциальная / спутниковая система ориентации и навигации с разнесенными антеннами / Л.П. Несенюк [и др.]** // Гирокоспия и навигация. - 2000. - №4. - С. 41 - 49.
7. **Лукин, В.Н.** Использование системы NAVSTAR для определения угловой ориентации объектов / В.Н. Лукин [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. - 1989. - №1. - С. 46 - 53.
8. **Власов, И.Б.** Точностные характеристики спутниковой навигационной аппаратуры с угломерным каналом / И.Б. Власов, В.Б. Пудловский, С.Н. Тарахнов // Вестник московского государственного технического университета: Спец. выпуск «Системы управления». - М.: - 1997. - №1. С. 114 - 126.
9. **3011 GPS Compass** // Рекламный проспект фирмы Thales Navigation www.thalesnavigation.com.
10. **FURUNO Satellite Compass. Model SC-60** // Рекламный проспект фирмы FURUNO. www.furuno.com.
11. **FURUNO Satellite Compass. Model SC-120** // Рекламный проспект фирмы FURUNO. www.furuno.com.
12. **МРК-11** (навигационно-измерительный комплекс) <http://ire.krgtu.ru/nir/razr/>, <http://www.gisa.ru/19722.html>.
13. **Навигационная аппаратура МРК-32.** Режим доступа: <http://krtz.su/Page61.html>.

14. **Степанов, О.А.** Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем / О.А. Степанов, Д.А. Кошаев // Гироскопия и навигация. - 1999. - №2. - С. 30 - 55.
15. **Блажнов, Б.А.** Определение относительной траектории движения и углов ориентации по фазовым спутниковым измерениям и данным микромеханического гироскопа / Б.А. Блажнов, Д.А. Кошаев // Гироскопия и навигация. - 2009. - №4. - С. 15 - 34.
16. **Чмых, М.К.** Цифровая фазометрия / М.К. Чмых // М.: Радио и связь. - 1993. - 184 с.: ил.
17. **Фатеев, Ю.Л.** Моделирование алгоритмов измерения угловых координат вектора-базы на основе глобальных навигационных спутниковых систем // В сб. «Цифровые радиотехнические системы и приборы». - Красноярск: КГТУ. - 1996. - С. 264 - 267.
18. **Фатеев, Ю.Л.** Алгоритмы измерения угловых координат объектов на основе глобальных навигационных спутниковых систем / Ю.Л. Фатеев, М.К. Чмых // В сб. «Цифровые радиотехнические системы и приборы». - Красноярск: КГТУ. - 1996. - С. 259 - 264.
19. **Чмых, М.К.** Алгоритмы измерения угловых координат объектов с неизвестной базой на основе глобальных навигационных спутниковых систем / В.А. Карнаухов, Ю.Л. Фатеев, В.Ф. Черемисин, М.К. Чмых // Проблемы техники и технологий XXI века: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Красноярск. -1994. - С. 77 - 78.
20. **Фатеев, Ю.Л.** Определение угловой ориентации на основе глобальных навигационных спутниковых систем // Радиотехника. - 2002. - №7. - С. 51-57.
21. **Пат. 2122217** Российская Федерация, МПК⁶ G 01 S 5/02. Способ угловой ориентации по радионавигационным сигналам космических аппаратов (варианты) / А.М. Алешечкин, Ю.Л. Фатеев, М.К. Чмых; заявитель и патентообладатель Красноярский гос. техн. ун-т. - № 97107921/09 ; заявл. 15.05.1997 ; опубл. 20.11.1998, Бюл. № 32. - 18 с.
22. **US Patent № 4963889.** Method and Apparatus for Precision Attitude Determination and Kinematic Positioning / Ronald R. Hatch. // Oct. 16, 1990.
23. **US Patent № 5296861.** Method and Apparatus for Maximum Likelihood Estimation Direct Integer Search in Differential Carrier Phase Attitude Determination Systems / Donald T. Knight // Mar. 22, 1994.
24. **Фатеев, Ю.Л.** Определение пространственной ориентации объектов по сигналам радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Электронный журнал «Исследовано в России». - 2004. - С. 781 - 791. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/071.pdf>.
25. **Алешечкин, А.М.** Аналитический метод расчета погрешностей определения угловой ориентации объектов по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Цифровая обработка сигналов. - 2009. - № 2. - С. 17 - 21.
26. **Фатеев, Ю.Л.** Разрешение фазовой неоднозначности в однобазовой угломерной аппаратуре ГЛОНАСС/GPS // Электронный журнал «Исследовано в России». - 2004. - С. 792 - 801. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/072.pdf>.
27. **Сосулин, Ю.Г.** Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. пособие для вузов // М.: Радио и связь. - 1992. - 304 с.: ил.
28. **Пат. 2379700** Российская Федерация, МПК G 01 S 5/02 (2010.01) Способ угловой ориентации объекта по сигналам спутниковых радионавигационных систем / А.М. Алешечкин, В.И. Кокорин, Ю.Л. Фатеев ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Технопарк «Радиоэлектроника». - № 2008131246/09 ; заявл. 28.07.2008 ; опубл. 20.01.2010, Бюл. №2. - 17 с.
29. **Алешечкин, А.М.** Алгоритмы разрешения неоднозначности при интерферометрических измерениях по сигналам СРНС / К.Ю. Костырев, А.М. Алешечкин // Решетнёвские чтения: материалы XIV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракетно-космических систем акад. М.Ф.Решетнева (10-12 нояб. 2010, г. Красноярск): в 2 ч / Под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2010. - Ч.1. - С. 153 - 154.

Abstract. This paper presents the development and study results of an attitude determination algorithm using GLONASS and GPS signals. The probability of correct ambiguity resolution in attitude determination is assessed for an exhaustive method, selecting the optimal combination of integer ambiguities by the maximum likelihood criterion.

Key words: GNSS, satellite, radio navigation, ellipse, radiodetermination ambiguities attitude determination is assessed for an exhaustive method, attitude determination, phase, ambiguity resolution, position, angular, sorting, maximum likelihood, probability