УДК 621.396.98(100):519.673

Критерий разрешения фазовых неоднозначностей комплексированной многоантенной спутниковой радионавигационной системы

Д.В. Калеев, А.Л. Переверзев, Ю.В. Савченко

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

kaleev@org.miet.ru

***Аннотация* — Разработан критерий разрешения фазовых неоднозначностей комплексированной многоантенной СРНС. За счет вычисления координат вектора базы в отсутствии сигналов спутников с погрешностью, удовлетворяющей разработанному критерию, сокращается время восстановления решения с сантиметровой точности с 3-5 минут до 1 секунды.**

***Ключевые слова* — многоантенные СРНС, фазовые неоднозначности, LAMBDA метод.**

I. Введение

Многоантенные спутниковые радионавигационные системы (СРНС), состоящие из двух и более антенн, широко применяются в геодезии, сельском хозяйстве и военной промышленности и позволяют производить высокоточное определение ориентации, относительных координат и взаиморасположения подвижных объектов. Данные системы работают по принципу совместного использования кодовых и фазовых измерений GPS/ГЛОНАСС в дифференциальном режиме и расчета двойных фазовых разностей [1]. Другим достоинством данной системы является возможность снижения стоимости за счет использования только одночастотных GPS L1 приемников при сохранении точностных характеристик определения относительных координат. Основными недостатками данных систем являются долгое время выхода на режим определения координат с сантиметровой точностью – 3-5 минут, вызванное необходимостью разрешения фазовых неоднозначностей (ФН) [2], а также низкая надежность работы в условиях сильной зашумленности сигналов или плохой видимости созвездия спутников. При "перезахвате" спутников после кратковременной потери сигнала необходимо повторное разрешение фазовых неоднозначностей, что в значительной степени ограничивает область применения многоантенных систем в условиях плотной застройки и других факторов зашумления сигналов СРНС. Так, при потере сигнала на секунду тратятся дополнительные 3-5 минут. Для сокращения времени повторного запуска выходные данные многоантенной системы комплексируют с данными сторонних систем [3, 4], обеспечивающих менее точное измерение относительных координат во время отсутствия сигналов СРНС. Однако нет оценки требований к точностным характеристикам построенных таким образом комплексированных систем, которые обеспечивали бы разрешение ФН с момента возобновления сигналов спутников СРНС.

Поэтому разработка критерия разрешения ФН, предъявляющего требования к точности определения вектора базы многоантенной системой, является актуальной задачей и освещается в данной статье.

II. Оценка времени разрешения фазовых неоднозначностей

Время выхода на режим определения относительных координат с сантиметровой точностью определяется необходимостью разрешения ФН, которая возникает при фазовых измерениях и обусловлена неизвестным целым числом волн принимаемого сигнала. Для решения данной задачи совместно используют кодовые и фазовые измерения. На основе кодовых измерений можно определить координаты с точностью до десятков сантиметров – Δ, тем самым сужается область поиска целого числа волн [5, 6]. Для каждого наблюдаемого спутника *i* в данной области возможно $D(\Delta)/\lambda_i$ наборов целых длин волн λ_i, где $D(\Delta)$ – диаметр области. Соответственно, для n спутников данное число наборов M определяется следующим образом:

$$M = \prod_{1}^{n} D(\Delta) / \lambda_i .$$

На рис. 1 изображены действительные координаты точки O, измеренные координаты O' – центр области Δ погрешности кодовых измерений R_{pr} с диаметром $D(\Delta)$, а также показаны фронты трех спутников, находящихся в данной области. С течением времени происходит изменение созвездия спутников, тем самым происходит поворот относительно точки действительных координат O, что сокращает число возможных кандидатов.

Распространенным способом определения целочисленного набора является LAMBDA-метод, впервые предложенный в [7], в основе которого лежит целочисленный метод наименьших квадратов с использованием Z-преобразования [8]. Данный метод первоначально использовался только для обработки GPS измерений, однако в [9] приводится метод, основанный на LAMBDA-методе, который обрабатывает и ГЛОНАСС измерения. Преобразованию подвергается входной вектор дробных ФН и ковариационная матрица. С изменением созвездия измерения по каналам становятся менее коррелированными, что повышает вероятность нахождения верного целочисленного набора. На практике это время составляет около 3-5 минут.

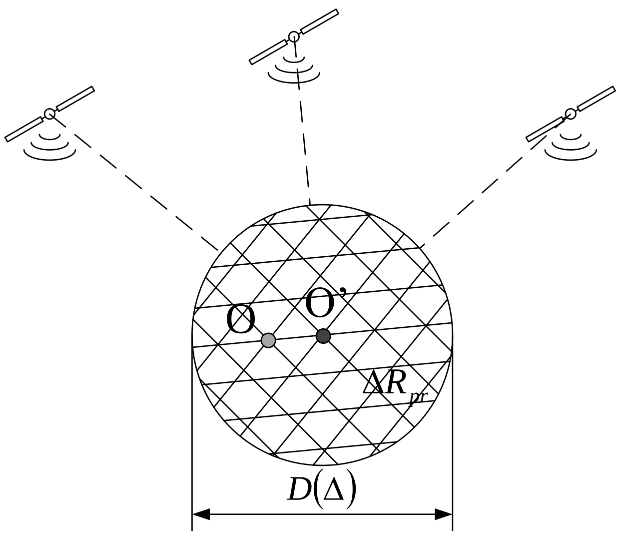

Рис. 1. Оценка фазовых неоднозначностей

Каждый "перезахват" сигналов СРНС после потери требует нового разрешения ФН, так как за время отсутствия навигационного решения меняется созвездие спутников и, соответственно, аккумулированные до этого фазовые измерения. Время отсутствия решения определяется следующей формулой:

$$T = t_1 + t_2, \tag{1}$$

где t_1 – время отсутствия сигналов СРНС, t_2 – время, необходимое для разрешения фазовых неоднозначностей. Продолжительность времени t_1 зависит от причины пропадания сигнала: так, при использовании системы в городских условиях время может достигать нескольких минут, а при превышении динамических характеристик приемника составлять всего одну секунду. В первом случае повторное разрешение ФН в процентном соотношении может составлять единицы процентов от времени отсутствия сигналов СРНС. Во втором случае время на 2-3 порядка больше времени отсутствия сигналов СРНС.

Для сокращения времени Т можно сократить второе слагаемое выражения (1) так, что t_2 = 0. Это может быть достигнуто путем ***одномоментного разрешения фазовых неоднозначностей***, под которым понимается вычисление целочисленных значений вектора неоднозначностей на первой эпохе возобновления приема сигналов СРНС на основе значений вектора базы, рассчитываемых комплексированной системой. Представленный ниже критерий справедлив лишь для систем использующих только GPS L1 приемники, которые по точностным характеристикам не уступают GPS/ГЛОНАСС системам.

III. Анализ погрешности определения фазовой неоднозначности

На рис. 2 представлен один из векторов многоантенной системы, определяющей относительные координаты вектора $\mathbf{b}$, соединяющего фазовые центры антенн k и m, получающих сигналы от двух спутников s_i и s_j.

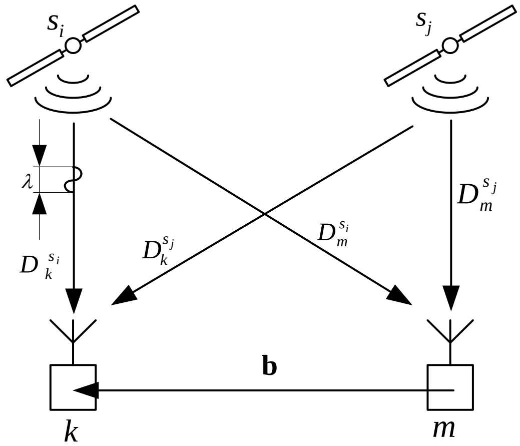

Рис. 2. Вектор многоантенной СРНС

Расстояние между приемником и спутником D определяется через фазовую псевдодальность следующим образом:

$$D = (N + \Phi) \cdot \lambda + c \cdot (\delta_{sat} - \delta_{rec}) - \delta_{ion},$$

где N – целое число периодов несущей частоты спутника СРНС в момент захвата сигнала приемником, Φ – дробное число, фаза несущей в момент захвата, λ – длина волны несущей, δ_{rec} – ошибка часов приемника, δ_{sat} – ошибка часов спутника, δ_{ion} – ошибка, вызванная задержками распространения сигналов СРНС в атмосфере.

Относительные координаты вычисляются из системы уравнений, записанных в матричном виде:

$$\mathbf{D}_k^{s_i} - \mathbf{D}_m^{s_i} = \left(\mathbf{N}_k^{s_i} - \mathbf{N}_m^{s_i}\right) \cdot \lambda + \left(\mathbf{\Phi}_k^{s_i} - \mathbf{\Phi}_m^{s_i}\right) \cdot \lambda + c \cdot (\delta_k - \delta_m).$$

Обозначим $\mathbf{SD}$ – матрица разностей расстояний от спутников до приемников k и m, $\mathbf{N}$ – разности начальных фазовых неоднозначностей, $\mathbf{\Phi}$ – первая фазовая разность, после чего разделим обе части на λ. Выражение принимает вид:

$$\frac{1}{\lambda}\mathbf{SD}_{km}^{s_i} = \mathbf{N}_{km}^{s_i} + \mathbf{\Phi}_{km}^{s_i} + \frac{c}{\lambda}\cdot\left(\delta_k - \delta_m\right).$$

Для того чтобы исключить погрешности уходов часов приемников вычислим вторые фазовые разности, выбрав самый высокий из спутников за опорный, обозначив его индексом "1":

$$\frac{1}{\lambda}\mathbf{DD}_{km}^{s_i s_1} = \mathbf{N}_{km}^{s_i s_1} + \mathbf{\Phi}_{km}^{s_i s_1}. \qquad (2)$$

С другой стороны, одинарная разность определяется следующим образом (рис. 3):

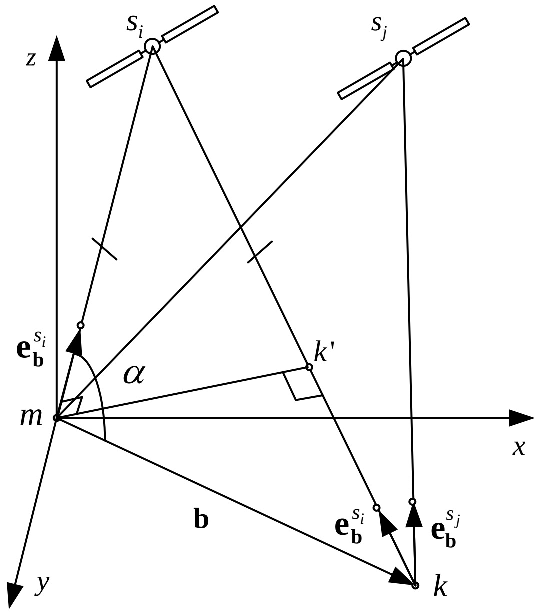

Рис. 3. Геометрическое представление одинарных разностей

При этом $\angle(s_i mk') = \angle(mk's_i) \to \pi/2$, так как расстояние до спутника многократно больше одинарной разницы. Тогда одинарная разница определяется следующим образом:

$$\mathbf{SD}_{km}^{s_i} = |\mathbf{b}|\cdot\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = |\mathbf{b}|\cdot\left|\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_i}\right|\cdot\cos(\alpha) = \mathbf{b}\cdot\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_i}.$$

Вычислим двойные разности:

$$\mathbf{DD}_{km}^{s_1 s_i} = \mathbf{b}\cdot\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_i} - \mathbf{b}\cdot\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_j} = \mathbf{b}\cdot\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_i s_j},$$

где $\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_i}$ и $\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_j}$ – единичные направляющие вектора, указывающие на спутники s_i и s_i соответственно. Подставляя данное выражение в выражение (2) и произведя замену $\mathbf{\Phi}_{km}^{s_i s_1}\cdot\lambda = \mathbf{R}$, мы получаем основную систему уравнений многоантенной системы:

$$\mathbf{R} = \mathbf{b}\cdot\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_i s_1} - \mathbf{N}_{km}^{s_i s_1}\lambda. \qquad (3)$$

В выражении (3) обозначим матрицу единичных $\mathbf{e}_\mathbf{b}^{s_i s_1}$ векторов как $\mathbf{H}$, опустим индексы и получим следующую зависимость:

$$\mathbf{N} = f(\mathbf{R},\mathbf{H},\mathbf{b}) = \frac{\mathbf{H}\cdot\mathbf{b} - \mathbf{R}}{\lambda}.$$

При этом выражение для $\mathbf{N}$ с учетом погрешностей измерений можно записать следующим образом:

$$\mathbf{N} = \hat{\mathbf{N}} + \Delta\mathbf{N} = f\left(\hat{\mathbf{R}} + \Delta\mathbf{R}, \hat{\mathbf{H}} + \Delta\mathbf{H}, \hat{\mathbf{b}} + \Delta\mathbf{b}\right),$$

где $\hat{\mathbf{N}}$ – это действительное целочисленное значение $\mathbf{N}$, $\Delta\mathbf{N}$ – погрешность, вносимая в вектор $\mathbf{N}$ погрешностями определения вектора базы $\Delta\mathbf{b}$, векторов двойных разностей $\Delta\mathbf{R}$ и единичных векторов $\Delta\mathbf{H}$.

Поскольку значение вектора базы в отсутствии сигналов СРНС вычисляется на основе сторонних систем, то можно говорить о том, что погрешности определения вектора базы, двойных разностей и единичных векторов не коррелированны. В таком случае для определения погрешности вычисления фазовых неоднозначностей можно воспользоваться разложением функции в ряд Тейлора с отбрасыванием всех членов, кроме первого, т.е. линеаризовать функцию погрешности. Тогда, согласно [10], погрешность вычисления ФН будет определяться следующей формулой, записанной в матричном виде:

$$\Delta\mathbf{N} = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial\mathbf{R}}\Delta\mathbf{R}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial\mathbf{H}}\Delta\mathbf{H}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial\mathbf{b}}\Delta\mathbf{b}\right)^2}. \qquad (4)$$

Формула (4) используется на практике для вычисления усредненной погрешности, но для определения максимально-допустимой погрешности необходимо ее преобразовать к следующему виду:

$$\Delta\mathbf{N}_{\max} = \frac{\partial f}{\partial\mathbf{R}}\Delta\mathbf{R} + \frac{\partial f}{\partial\mathbf{H}}\Delta\mathbf{H} + \frac{\partial f}{\partial\mathbf{b}}\Delta\mathbf{b}. \qquad (5)$$

За счет использования дифференциального режима работы СРНС при вычислении двойных разностей и единичных векторов компенсируются погрешности ухода часов приемников и спутников, влияние ионосферных задержек для небольших баз (до 100 метров [11]). То есть $\Delta\mathbf{R}\to 0; \Delta\mathbf{H}\to 0$, тогда выражение (5) примет вид:

$$\Delta\mathbf{N}_{\max} = \frac{\partial f(\mathbf{R},\mathbf{H},\mathbf{b})}{\partial\mathbf{b}}\Delta\mathbf{b} = -\frac{\mathbf{H}}{\lambda}\Delta\mathbf{b}. \qquad (6)$$

IV. РАЗРЕШЕНИЕ ФАЗОВЫХ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ

Критерий разрешения ФН получим путем анализа выражения (6). Видно, что погрешность определения вектора неоднозначностей зависит от погрешности определения вектора базы сторонними системами. Для обеспечения одномоментного определения фазовых неоднозначностей необходимо ограничить погрешность $\Delta\mathbf{N}_{\max}$ следующим условием:

$$\left|\Delta\mathbf{N}_{\max}\right| < 0{,}5,$$

что позволит однозначно округлить значения N до целого числа. Таким образом, условием одномоментного разрешения фазовых неоднозначностей является выполнение следующего неравенства:

$$\left|\frac{-\mathbf{H}\cdot\Delta\mathbf{b}}{\lambda}\right| < 0{,}5. \qquad (7)$$

Подставляя значения векторов $\mathbf{e}_{1i}$ в (7), получим:

$$\begin{cases} \left|\mathbf{e}_{12}\cdot\Delta\mathbf{b}\right| < 0{,}5\lambda \\ \left|\mathbf{e}_{13}\cdot\Delta\mathbf{b}\right| < 0{,}5\lambda \\ \cdots \\ \left|\mathbf{e}_{1n}\cdot\Delta\mathbf{b}\right| < 0{,}5\lambda \end{cases}. \qquad (8)$$

Выражение (8) представим в виде:

$$\begin{cases} \left|\Delta\mathbf{b}\right| < \dfrac{0{,}5\lambda}{\left|\mathbf{e}_{12}\right|\cdot\left|\cos\angle\left(\mathbf{e}_{12},\Delta\mathbf{b}\right)\right|} \\ \left|\Delta\mathbf{b}\right| < \dfrac{0{,}5\lambda}{\left|\mathbf{e}_{13}\right|\cdot\left|\cos\angle\left(\mathbf{e}_{13},\Delta\mathbf{b}\right)\right|} \\ \cdots \\ \left|\Delta\mathbf{b}\right| < \dfrac{0{,}5\lambda}{\left|\mathbf{e}_{1n}\right|\cdot\left|\cos\angle\left(\mathbf{e}_{1n},\Delta\mathbf{b}\right)\right|} \end{cases}. \qquad (9)$$

Необходимо оценить максимально допустимое значение $\left|\Delta\mathbf{b}\right|$, которое предъявляет наиболее жесткие требования к точности определения вектора базы:

$$\left|\Delta b_{\max}\right| < \frac{0{,}5\lambda}{\max\left\{\left|\mathbf{e}_{1n}\right|\cdot\left|\cos\angle\left(\mathbf{e}_{1n},\Delta\mathbf{b}\right)\right|\right\}}. \qquad (10)$$

Для этого необходимо оценить выражение в знаменателе $\max\left\{\left|\mathbf{e}\right|\cdot\left|\cos\angle\left(\mathbf{e},\Delta\mathbf{b}\right)\right|\right\}$, это можно сделать тремя способами:

A. Аналитическая оценка

В данном случае оценка сводится к анализу максимальных значений переменных, входящих в знаменатель выражения (10), согласно следующему утверждению – максимальное значение произведения двух величин равно произведению максимумов данных величин. Данное утверждение справедливо и для дискретных величин и может быть записано в виде:

$$\max\{\mathbf{A}\cdot\mathbf{B}\} = A_{\max}\cdot B_{\max},$$

где $A_{\max} = \left|\mathbf{e}_{\max}\right|$, $B_{\max} = \max\left(\left|\cos\angle\left(\mathbf{e}_{1i},\Delta\mathbf{b}\right)\right|\right) = 1$.

Угол вознесения спутников маскируется приемником, и его минимальное значение составляет 20° [4], а угол вознесения самого высокого спутника $70-110^\circ$, то максимальное значение угла между самым высоким спутником и оставшимися спутниками $\leq 90^\circ$. Тогда максимальное значение модуля разницы единичных векторов, умноженного на косинус, будет определяться как:

$$\left|\mathbf{e}_{\max}\right| \leq \sqrt{2}. \qquad (11)$$

С учетом (9) и (10) имеем:

$$\left|\Delta\mathbf{b}_{\mathrm{theor}}\right| < 6{,}72\,\text{см}. \qquad (12)$$

B. Численное моделирование

Построение модели нахождения максимального значения $\left|\mathbf{e}_{\max}\right|$ сводится к заданию единичных векторов случайным образом. Поскольку неизвестна функция плотности распределения, то согласно центральной теореме теории вероятности за закон распределения возьмем нормальное распределение, т.к. единичные вектора должны быть слабо коррелированны и зашумлены в одинаковой степени, поскольку исключены уходы часов и атмосферных задержек. Первый начальный момент возьмем равным 0, второй центральный равным 1.

Таким образом, численное моделирование состоит из следующих шагов:

1) задание согласно закону распределения матрицы составляющих разницы векторов размером Kx3. Где K = 30, что объясняется максимально возможным количеством обрабатываемых каналов приемников СРНС.

2) Составление матрицы векторов путем поэлементного деления координат векторов на их модуль:

$$\mathbf{H}(i,) = \left(e_{ix}, e_{iy}, e_{iz}\right) \Big/ \sqrt{e_{ix}^2 + e_{iy}^2 + e_{iz}^2}\ .$$

3) Исключение векторов, угол вознесения которых меньше 20°, т.е. удовлетворяющих условию:

$$\frac{\arcsin\left(\mathbf{H}(i,z)\right)\cdot 180^\circ}{\pi} > 20^\circ.$$

Если не использовать данное условие, то в значительной степени ухудшается матрица ковариации, что ведет к увеличению времени начального определения ФН.

4) Определение вектора опорного спутника из оставшихся векторов:

$$\mathbf{e}_{\mathrm{m}} = \mathbf{H}(i,),$$

где i – это индекс вектора матрицы с наибольшим значением вознесения – $\max\{\arcsin(\mathbf{H}(,z))\}$.

5) Нахождение максимального значения модуля разности единичных векторов с вектором опорного спутника:

$$|\mathbf{e}_{\max}| = \max\left\{\sqrt{(e_{ix}-e_{mx})^2+(e_{iy}-e_{my})^2+(e_{iz}-e_{mz})^2}\right\}.$$

В результате численного моделирования была получена следующая оценка:

$$|\mathbf{e}_{\max}| = 1{,}21;$$
$$P = 0{,}95;$$
$$n = 1000,$$

где P – вероятность оценки, n – размер выборки. Таким образом, максимально допустимая погрешность определения вектора базы многоантенной системы определяется следующим неравенством:

$$|\Delta\mathbf{b}_{\text{model}}| < 7{,}85\,\text{см}. \qquad (13)$$

C. Эмпирическая оценка

Результаты численного моделирования были подтверждены экспериментальными данными. В табл. 1 представлены условия проведения опытов с использованием одночастотных GPS/ГЛОНАСС приемников NAVIS.

Таблица 1

Условия получения эмпирической оценки

Параметр	Значение
Число опытов	100
Длительность опыта	1 час
Длина вектора базы	1,2 м
Оценка PDOP	1,15
Сред. число каналов	12

На основе данных опытов было получено следующее значение модуля разницы единичных векторов:

$$|\mathbf{e}_{\max}| = 1{,}17.$$

С учетом (11):

$$|\Delta\mathbf{b}_{\text{model}}| < 8{,}13\,\text{см}. \qquad (14)$$

Сравнивая оценки (12)-(14) видим, что все они одного порядка. Аналитическая оценка предъявляет самые жесткие требования, что неприменимо на практике вследствие небольшой вероятности, поэтому за максимально допустимую погрешность вектора базы возьмем оценку, полученную в результате численного моделирования. Данная оценка расходится с экспериментальной в связи с малым числом опытов.

Таким образом, условием разрешения фазовых неоднозначностей комплексированной многоантенной системы является возможность определения вектора базы с максимально допустимой погрешностью, удовлетворяющей следующему неравенству:

$$|\Delta\mathbf{b}_{\max}| < 7{,}85\,\text{см}.$$

V. Заключение

В статье было проанализировано время нахождения целочисленных значений ФН СРНС, а также предложен критерий их разрешения. Данный критерий предъявляет требования к точностным характеристикам систем, комплексируемых с многоантенной системой. Одним из способов построения таких систем может служить комплексирование с инерциальным измерительным устройством (ИИУ). При комплексировании с ИИУ инерциально-спутниковая многоантенная система продолжает рассчитывать навигационное решение во время отсутствия сигналов СРНС и при их "перезахвате" разрешает ФН, сокращая время старта с 3-5 минут до 1 секунды.

Литература

[1] Алексеев В.Е., Соловьев А.Н. Многоантенные GPS-системы с дециметровой точностью позиционирования // Информационные технологии - 2009. №4 С. 70-75.

[2] Алексеев В.Е., Соловьев А.Н. Определение вектора многоантенной GPS системы на основе процедуры разрешения фазовых неоднозначностей // Известия высших учебных заведений. Электроника. №5 (75) 201. С. 5-8.

[3] Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной сислемы ГЛОНАСС / Монография. 2012. С. 136–165.

[4] Соловьев А.Н., Серов А.Н., Алексеев В.Е. Методы построения интегрированных систем на основе фазовых измерений в спутниковых навигационных системах / Сб. науч. трудов. «Алгоритмическое обеспечение и проектирование микропроцессорных систем». М., МИЭТ, 2008.

[5] Брынь М.Я., Бронштейн Г.С. Инженерная геодезия и геоинформатика / Под ред. С.И. Матвеев // Учеб. для вузов - Фонд "Мир". 2012. С. 166–167.

[6] Соловьев А.Н., Серов А.Н., Алексеев В.Е. Методы сглаживания дальномерных измерений на основе фазовых измерений в спутниковых навигационных системах / Сб. науч. трудов. «Алгоритмическое обеспечение и проектирование микропроцессорных систем». М., МИЭТ, 2004.

[7] Fincke, U. and Pohst, M. On reduction algorithms in non linear integer mathematical programming. Operations Research Proceedings, 1983, Springer-Verlag, Berlin, 1984

[8] De Jonge P, Tiberius, CCJM (1996) LAMBDA method for integer ambiguity estimation: im- 20 plementation aspects. In Delft Geodetic Computing Center LGR-Series, No.12

[9] Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы. М.: Радиотехника, 2008

[10] МИ 2083-90 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей»

[11] Клюшин Е.Б., Киселев М.И., Михелев Д.Ш., Фельдман В.Д. Инженерная геодезия: учебник для вузов / Под ред. Михалева Д.Ш. - 4-е изд., испр. - М.: Издательский центр «Академия», 2004.

Criteria of resolution of phase ambiguities for complexed multi-antenna global navigation satellite system

D.V. Kaleev, A.L. Pereverzev, Yu.V. Savchenko

National Research University of Electronic Technology,

kaleev@org.miet.ru

***Keywords* — complexed multi-antenna GNSS, phase ambiguities, LAMBDA method.**

ABSTRACT

Multi-antenna GNSS, due to the high accuracy of relative coordinates determination (centimeter and millimeter accuracy) and relatively low cost, are widely used in various industries [1][2]. The main drawback of these systems is quite a long start period of each time of "capturing" satellite signals to estimate the fixed vector N of phase ambiguities. To eliminate this drawback, we use a complexed multi-antenna system that continues calculating coordinates of base vector even if a signal loss occurs[3][4].

This article discusses the analysis of time that one needs to resolve phase ambiguities, the estimation of error of vector N produced by complexed system and the criteria of fast resolution of fixed vector N.

The analysis of time to resolve the phase ambiguities was done. One needs three-five minutes to get a good Variance-Covariance matrix that determines ideal integer vector N. LAMBDA method is used to calculate candidates for vector N[8][9].

The estimation of error of vector N was done. The equation for calculating vector N without waiting for decorrelation of the elements was obtained.

The criterion for resolving phase ambiguities was proposed. This criterion makes demands to the accuracy parameters of complexed multi-antenna system. When the criterion is met the time of getting integer values of N decreases from three minutes to one second.

REFERENCES

[1] Alexeev V.E., Solovyev A.N. Multi-antenna GPS-systems with decimeter accuracy of positioning // Infornatzionnie Tekhnologii - 2009. №4 pp. 70-75 (in Russian).

[2] Alexeev V.E., Solovyev A.N. Determing base vector of the multi-antenna GPS on the basis of resolvingphase ambiguities // Izvestiia vuzov. Electronika. №5 (75) 201. pp. 5-8 (in Russian).

[3] Tjapkin V.N., Garin E.N. Methods for detemination of navigational parameters of mobile objects using GLONASS / Monografija. 2012. pp. 136–165 (in Russian).

[4] Solovyev A.N., Serov A.N., Alekseev V.E. Methods for building integrated systems based on phase measurements for satellite navigation systems / Sb. nauch. trudov. «Algoritmicheskoe obespechenie i proektirovanie mikroprocessornyh sistem». M., MIET, 2008 (in Russian).

[5] Bryn M.Ja., Bronshtejn G.S. Engineering Geodesy and Geoinformatics / Pod red. S.I. Matveev // Ucheb. dlja vuzov - Fond "Mir". 2012. pp. 166–167 (in Russian).

[6] Solovyev A.N., Serov A.N., Alekseev V.E. Smoothing Methods for distance measurement based on phase measurements of satellite navigation systems / Sb. nauch. trudov. «Algoritmicheskoe obespechenie i proektirovanie mikroprocessornyh sistem». M., MIET, 2004 (in Russian).

[7] Teunissen, P.J.G. and C.C.J.M. Tiberius (1994). Integer least-squares estimation of GPS phase ambiguities. *Proc. of KIS'94.* Banff, Canada. pp. 221-231

[8] De Jonge P, Tiberius, CCJM (1996) LAMBDA method for integer ambiguity estimation: im- 20 plementation aspects. In Delft Geodetic Computing Center LGR-Series, No.12

[9] Povalyaev A.A. Satellite navigation systems. M.: Radiotehnika, 2008 (in Russian)

[10] MI 2083-90 «GSI. Indirect measurements. Determination of the measurement results and the estimation of their errors» (in Russian).

[11] Kljushin E.B., Kiselev M.I., Mihelev D.Sh., Feldman V.D. Engineering surveying: a textbook for high schools / Pod red. Mihaleva D.Sh. - 4-e izd., ispr. - M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2004 (in Russian).