

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВЫХ GPS НАБЛЮДЕНИЙ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ

### Введение. Постановка задачи

Решение задач высокоточного определения местоположения (позиционирования) по сигналам GPS/GNSS невозможно без использования фазовых наблюдений [1 – 3]. Главными задачами обработки фазовых GPS/GNSS наблюдений являются устранение циклических/полуциклических скачков и разрешение фазовой неоднозначности [1 – 3]. Задача разрешения фазовой неоднозначности (РФН) заключается в определении начального количества целых циклов для каждого участка наблюдений группы спутников относительно одного (любого) из них – референсного, т.к. задача РФН может быть решена однозначно только для т.н. двойных разностей фазовых наблюдений при соблюдении определенных условий и ограничений [1]. При этом полагается, что для каждого участка наблюдений фазовые скачки исключены, в противном случае участок со скачком (скачками) должен быть разбит на два или более отдельных участка с непрерывным («бескачковым») изменением фазы. Наличие неустраненных фазовых скачков приводит к увеличению количества начальных неоднозначностей, уменьшению интервалов накопления целевых функций и, соответственно, к уменьшению надежности РФН. Поэтому задачи устранения фазовых скачков и разрешения начальной фазовой неоднозначности должны решаться во взаимосвязи. Правильное согласование начальных неоднозначностей (количества целых циклов) в двойных разностях фазовых наблюдений – между станциями (одинарные дифференциальные разности) и между спутниками текущего рабочего созвездия – гарантирует получение сантиметровой, а в ряде случаев и миллиметровой, точности, как в статическом, так и в кинематическом (для движущихся объектов) режимах позиционирования.

В данной работе представлены и рассматриваются результаты разработки и исследования одного из методов РФН для линейной комбинации (ЛК) фазовых GPS наблюдений разностной частоты – Wide Lane (WL) с длиной волны  $\lambda = 86,2$  см [1, 4, 5]. При этом рассматривается задача не только оценки надежности РФН для данной линейной комбинации, но и оценки потенциальных возможностей использования фазовых GPS наблюдений разностной частоты для высокоточного позиционирования, в частности при выполнении аэрофотосъемок и других геодезических работ в кинематическом режиме. Дальнейшее изложение ведется в предположении, что фазовые наблюдения непрерывны, т.е. циклические и полуциклические фазовые скачки GPS- наблюдений обеих частот устранены.

Известным подходом к задаче РФН является подход, основанный на комбинировании фазовых и кодовых наблюдений – комбинация Melbourne-Wübbena (MW) [1, 4 – 6]. Замечательное достоинство этой известной комбинации заключается в том, что она является «безгеометрической», не содержит эфемеридно-временных, тропосферных и ионосферных составляющих погрешностей наблюдений, а соответствующие двойные разности ЛК MW не содержат и аппаратных задержек, но содержит искомую фазовую неоднозначность WL в присутствии многолучевости и шумов кодовых наблюдений. Поэтому, усредняя комбинацию MW (двойную разность) по времени, можно оценить целочисленную неоднозначность как непрерывную величину, а затем округлить ее до ближайшего целого значения [1]. Оценка неоднозначностей линейных фазовых комбинаций WL с использованием кодово-фазовых комбинаций MW позволяет перейти к однозначным фазовым WL- наблюдениям [4, 5]. Но проблема заключается в том, чтобы получить достоверную оценку в условиях медленно изменяющейся многолучевой составляющей кодовых наблюдений, особенно, когда наблюдения выполняются в разных условиях и при различных настройках GPS приемников.

Необходимо отметить, что в доступных авторам источниках отсутствуют какие-либо достаточные сведения и рекомендации по решению этой проблемы в изложенной постановке. В целом, множество исследований, посвященным задачам РФН GPS/GNSS-наблюдений, в той или иной степени рассматривают задачу и условия верификации получаемого решения РФН, т.е. надежности оценивания целочисленных переменных, так как цена ошибки даже в один фазовый цикл – многократное ухудшение точности координатного решения.

С целью исследования возможностей использования кодово-фазовых комбинаций MW ранее одним из авторов данной статьи были проведены специальные исследования, в результате которых предложен надежный алгоритм РФН для ЛК WL и процедура верификации оценки целочисленных неоднозначностей двойных разностей фазовых наблюдений разностной частоты [6]. Ограничением предложенного метода является то, что для решения задачи РФН использовались традиционные двойные разности фазовых наблюдений, в то время как формирование и обработка таких разностей применительно к ЛК MW приводит к частичной потере информации, т.к. участки совместной видимости референцного и текущего спутников, как правило, имеют меньшую протяженность, чем каждый из участков отдельно. Это при определенных условиях приводит к недостоверной оценке неоднозначностей и уменьшению надежности РФН. Поэтому, с точки зрения задачи РФН WL с использованием кодово-фазовых комбинаций MW, представляет значительный интерес разработка и исследование более эффективных методов и алгоритмов решения данной задачи, увеличения надежности РФН, а также решения финальной задачи точного позиционирования с максимально достижимой точностью и достоверностью с использованием WL-комбинации. Это и является целью настоящей работы, где излагаются основные результаты создания и исследований соответствующего алгоритмического и программного комплекса обработки GPS наблюдений для режима кинематической съемки субдециметровой/сантиметровой точности.

### **1. Краткое описание разработанного программно-алгоритмического комплекса для решения задачи высокоточного кинематического позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты. Отличительные особенности предложенной процедуры обработки двухчастотных GPS наблюдений**

В настоящей работе кратко представлены текущие результаты разработки и верификации совокупности алгоритмов и программных модулей решения соответствующих задач обработки GPS наблюдений, включая модули РФН наблюдений разностной частоты, и определения параметров движения объектов. Разработанный программный пакет использует в качестве входных данных результаты предварительной обработки («пре-процессинга») GPS наблюдений, полученные с использованием отечественного программного комплекса «ОСТАВА\_PPA» [7, 8, 9].

В состав алгоритмического и программного обеспечения входят следующие основные модули обработки GPS- наблюдений:

- разрешения фазовой неоднозначности WL наблюдений с использованием линейной комбинации Melbourne-Wübbena и верификации полученного решения;
- «доразрешения» фазовой неоднозначности сетевым методом (уравнивание целочисленных неоднозначностей путем замыкания контуров наземной конфигурации станций и текущего спутникового созвездия), а также «доразрешения» фазовой неоднозначности WL наблюдений, для которых предложенный способ обработки ЛК Melbourne-Wübbena не позволил достичь надежного решения задачи РФН;
- расчета и ввода в наблюдения тропосферных (использовалась модель MOPS[10]) и ионосферной коррекций – модели Клобушара (Klobuchar) и GIM IONEX [11];
- формирования весовой матрицы наблюдений;
- фильтрации фазовых WL наблюдений с использованием наблюдений на частоте L1 GPS;

- учета фазовых характеристик и пространственного разнеса фазовых центров приемных антенн на частотах L1 и L2 GPS;

- взвешенного МНК – решения [12] навигационной задачи по фазовым WL наблюдениям и расчета корреляционной матрицы погрешностей оцениваемых параметров.

На текущий момент полностью завершены исследования алгоритмов: РФН WL наблюдений с использованием ЛК Melbourne-Wübbena с верификацией полученного решения, доразрешения фазовой неоднозначности сетевым методом, решения навигационной задачи по фазовым WL наблюдениям с учетом моделирования ионосферной и тропосферной составляющих погрешности GPS-наблюдений.

Разработанные алгоритмы и программные модули имеют следующие существенные отличительные особенности:

- при решении задачи РФН не требуется формирование двойных разностей наблюдений, поскольку предложен метод РФН с формированием т.н. «виртуальных» двойных разностей наблюдений (см. ниже раздел 2), а для оценки надежности и верификации РФН применяются специально разработанные алгоритмы, использующие техники автокорреляционного анализа кодово-фазовых ЛК MW [6]; при этом оценка вероятности принятия правильного решения с учетом принятых допущений составляет не менее  $P=0,999$ ; метод может быть использован в однобазовом и многобазовом режимах обработки как для статических, так и для кинематических наблюдений;

- разработанная методика «доразрешения» фазовых неоднозначностей и верификации РФН в целом может применяться как для сети базовых станций, так и для текущей конфигурации спутников для каждой пары станций; методика использует принцип уравнивания целочисленных неоднозначностей путем замыкания контуров (треугольников) наземной конфигурации станций и текущего спутникового созвездия с ограничивающими условиями;

- разработанные и исследованные алгоритмы РФН с использованием ЛК MW носят универсальный характер и могут быть применены для «сетевого» разрешения фазовой неоднозначности – применительно к наблюдениям сети наземных GPS станций и групп «роверов» (статические и движущиеся объекты);

- использование разработанных алгоритмов более точного расчета и учета в WL наблюдениях ионосферных задержек с использованием модели ионосферы IONEX (IGS) [11] позволяет повысить надежность «доразрешения» фазовых неоднозначностей WL наблюдений даже на коротких временных участках и базовых расстояниях до 250 – 300 км.

## 2. Процедура РФН и высокоточного позиционирования с использованием «виртуальных» двойных разностей WL наблюдений

Предлагаемая процедура РФН WL наблюдений включает следующие действия.

1. Формируем ЛК Wide Lane (1) фазовых наблюдений, Narrow Lane [1] (2) кодовых наблюдений и комбинации Melbourne-Wübbena (3) на трассе спутник-приемник [6]:

$$\hat{L}_w^j(t) = F_k^j + \gamma \cdot I_k^j - N_w^j \cdot \lambda_w + \Delta c_w + \delta L_w^j, \quad (1)$$

$$\hat{S}_N^j(t) = F_k^j + \gamma \cdot I_k^j + \Delta c_N + \delta S_N^j, \quad (2)$$

$$\hat{\mu}_k^j = \hat{L}_w^j - \hat{S}_N^j = N_w^j \cdot \lambda_w + \Delta c_{wN} + \hat{\mu}_{MP}^j, \quad (3)$$

где  $F_k^j = R + Tr + \Delta_k + \Delta^j$  – функция частотно-независимых параметров;

$R = \sqrt{(X_j - x_i)^2 + (Y_j - y_i)^2 + (Z_j - z_i)^2}$  – геометрическая дальность;

$Tr$  – погрешность, обусловленная тропосферной задержкой навигационных сигналов;

$X_j, Y_j, Z_j$  – координаты  $j$ -го спутника;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты  $k$ -го приемника;

$\Delta_k, \Delta^j$  – погрешности, связанные с уходом шкал времени  $j$ -го спутника и  $k$ -го приемника относительно шкалы системного времени соответственно;

$N_w^j$  – начальные неоднозначности фазовых наблюдений на разностной частоте;

$\lambda_w = 0,86 \text{ i} ; \gamma \approx 1,28$ ;

$\Delta c_w, \Delta c_N, \Delta c_{wN}$  – неизвестные величины (постоянные на интервале наблюдений), пропорциональные задержкам в аналоговых трактах  $j$ -го спутника и  $k$ -го приемника;

$\delta L_w^j, \delta S_N^j, \delta \hat{\mu}_{MP}^j$  – погрешности, обусловленные многолучевостью распространения навигационных сигналов и шумами наблюдений.

2. Оцениваем величины  $\hat{\mu}$  для каждой трассы «спутник-приемник» с применением алгоритмов оценки и верификации, предложенных в работе [6]. Выбираем референцный спутник (участок) и относительно него трансформируем систему уравнений следующим образом (4):

$$\begin{cases} \langle \hat{\mu}_1^{(ref)}(t) \rangle = \omega_1^{(ref)} \\ \langle \hat{\mu}_2^{(ref)}(t) \rangle = \omega_1^{(ref)} + \Delta\alpha_{21}^{(1)} \\ \langle \hat{\mu}_1^{(j)}(t) \rangle = \omega_1^{(ref)} + \nabla\beta_1^{(j,1)} \\ \langle \hat{\mu}_2^{(j)}(t) \rangle = \omega_1^{(ref)} + \nabla\beta_1^{(j,ref)} + \Delta\alpha_{21}^{(ref)} + \nabla\Delta N_{W21}^{(j,ref)} \cdot \lambda_w \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\hat{\omega}_1^{(ref)} = N_{W1}^{(ref)} \cdot \lambda_w + \Delta c_{WN1}^{ref}$ ,

$\Delta\hat{\alpha}_{21}^{(ref)} = \Delta N_{W21}^{(ref)} \cdot \lambda_w + \Delta c_{WN21}$ ,

$\nabla\hat{\beta}_1^{(j,ref)} = \nabla N_{W1}^{(j,ref)} \cdot \lambda_w - \nabla B^{(j,ref)} = N_{W1}^{(j)} \cdot \lambda_w - N_{W1}^{(ref)} \cdot \lambda_w - \Delta c_{WN}^{(j)} + \Delta c_{WN}^{(ref)}$ ,

$\nabla\Delta\hat{N}_{W21}^{(j,ref)} = \Delta N_{W21}^{(j)} - \Delta N_{W21}^{(ref)} = [N_{W2}^{(j)} - N_{W1}^{(j)}] - [N_{W2}^{(ref)} - N_{W1}^{(ref)}]$ .

3. Формируем вектор входных параметров:

$$\langle \bar{\mu} \rangle_{[2 \cdot n]} = \bar{F} \left\{ \begin{matrix} \omega_1, & \Delta\alpha_{21}, & \nabla\bar{\beta}, & \nabla\Delta\bar{N} \\ [1] & [1] & [n-1] & [n-1] \end{matrix} \right\} + \delta\bar{\mu}. \quad (5)$$

Корреляционная матрица входных параметров:

$$K_\mu = \text{diag} \{ \sigma_{\mu_1}^2, \sigma_{\mu_2}^2, \dots, \sigma_{\mu_n}^2 \}. \quad (6)$$

Оценки  $\bar{\mu}$  и  $\sigma_{\mu_n}^2$  формируются с использованием алгоритма оценки и верификации, описанного в [6].

4. Формируем МНК-оценку выходных параметров

$$\hat{\Theta} = [A^T \cdot K_\mu^{-1} \cdot A]^{-1} \cdot A^T \cdot K_\mu^{-1} \cdot \langle \bar{\mu} \rangle, \quad (7)$$

где  $A_{[2 \cdot n \times 2 \cdot n]} = \left\| \frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{\theta}} \right\|$  - якобиан преобразования;

$$\hat{\bar{\theta}}_{[2 \cdot n]} = \left\| \omega_1 \Delta \alpha_{21} \quad \nabla \bar{\beta}^{(2,1)} \quad \dots \quad \nabla \bar{\beta}^{(n,1)} \quad \nabla \Delta \bar{N}^{(2,1)} \quad \dots \quad \nabla \Delta \bar{N}^{(n,1)} \right\|^T \quad (9)$$

Корреляционная матрица погрешностей выходных параметров:  $K_{\theta} = [A^T \cdot K_{\mu}^{-1} \cdot A]^{-1}$ .

5. Оцениваем целочисленные неоднозначности  $\nabla \Delta \bar{N}^{(n,1)}$  согласно алгоритму верификации [6]. В случае разрешения  $\nabla \Delta \bar{N}^{(n,1)}$  учитываем его в (4) и формируем новый вектор  $\bar{\mu}$ , при этом матрица  $K_{\mu}$  остается неизменной.

Повторяем операции 3), 4), 5) до тех пор, пока получим достоверные финальные целочисленные оценки  $\nabla \Delta \bar{N}^{(n,1)}$ .

6. Формируем вектор поправок в WL- наблюдения:

$$\begin{cases} \hat{\mu}_1^{(ref)} = \hat{\omega}_1^{(ref)} \\ \hat{\mu}_2^{(ref)} = \hat{\omega}_1^{(ref)} + \widehat{\Delta \alpha_{21}} \\ \hat{\mu}_1^{(j)} = \hat{\omega}_1^{(ref)} + \widehat{\nabla \beta}_1^{(j,1)} \\ \hat{\mu}_2^{(j)} = \omega_1^{(ref)} + \widehat{\nabla \beta}_1^{(j,ref)} + \widehat{\Delta \alpha_{21}}^{(ref)} + \widehat{\nabla \Delta N_{W21}}^{(j,ref)} \cdot \lambda_W \end{cases} \quad (10)$$

В случае, если  $\widehat{\nabla \Delta N_{W21}}^{(j,ref)}$  недостоверны, они не вводятся в вектор поправок, а включаются в оцениваемые параметры при дальнейшей обработке.

7. Вводим полученный вектор поправок в фазовые наблюдения разностной частоты:

$$\hat{L}_{W_i}^j(t) = F_i^j(t) + \gamma \cdot I_i^j(t) - \underbrace{\mu_i^j}_{\substack{\text{оценка } \hat{\mu}_i^j \\ \text{по ЛК MW}}} + [b_{\Phi_{W_i}} - B_{\Phi_{W_i}}^j] + \delta L_{W_i}^j(t) \quad (11)$$

После ввода коррекций  $\hat{\mu}_i^j$  в уравнения  $\hat{L}_{W_i}^j(t)$ , последние могут быть представлены в виде (в зависимости от того, разрешена ли фазовая неоднозначность  $\widehat{\nabla \Delta N_{W21}}^{(j,ref)}$  или нет):

$$\begin{cases} [\hat{L}_{W_i}^j(t)]^* = F_i^j(t) + \gamma \cdot I_i^j(t) + [c_i - C^j] + \delta L_{W_i}^j(t), \text{ если РФН выполнена} \\ [\hat{L}_{W_i}^j(t)]^* = F_i^j(t) + \gamma \cdot I_i^j(t) + [c_i - C^j] - \nabla \Delta N_{i1}^{j1} + \delta L_{W_i}^j(t), \text{ если РФН не выполнена} \end{cases}$$

$c_i, C^j$  – неизвестные постоянные, обусловленные задержками сигналов в трактах приемников ( $c_i$ ) и спутников ( $C^j$ ). Эти величины имеют значения порядка групповых/фазовых задержек в соответствующих высокочастотных трактах.

Если РФН выполнена полностью, то величины  $\hat{\mu}_i^j$  могут быть уточнены снова и система уравнений недифференцированных наблюдений примет окончательный вид:

$$[\hat{L}_{wi}^j(t)]^* = F_i^j(t) + \gamma \cdot I_i^j(t) + [c_i - C^j] + \delta L_i^j(t).$$

Одним из эффективных путей решения задачи «доразрешения» фазовой неоднозначности (там, где способ обработки ЛК Melbourne-Wübbena не позволил достичь надежного решения задачи РФН) заключается в применении сетевого метода – уравнивания целочисленных неоднозначностей путем замыкания контуров (треугольников) наземной конфигурации станций и текущего спутникового созвездия. Ограничивающее условие для любого треугольника с вершинами  $i, j, k$  ( $k > j > i$ ) имеет вид

$$N_{ji} + N_{kj} + N_{ik} = 0.$$

Другой подход к решению задачи «доразрешения» фазовой неоднозначности предполагает обработку одинарных разностей WL наблюдений и получение совместной оценки параметров местоположения, расхождений шкал времени «роверного» приемника и базовой станции, а также оставшихся неразрешенными неоднозначностей. В этом случае полученные континуальные МНК – оценки неоднозначностей округляются и далее целочисленные оценки также подвергаются верификации на достоверность описанными здесь и в работе [6] способами.

Предложенная процедура РФН с использованием «виртуальных» двойных разностей WL наблюдений включает оба описанных подхода «доразрешения» фазовой неоднозначности для достижения наилучшего финального решения.

В итоге для координатных определений (позиционирования) после расчета одинарных (дифференциальных) разностей однозначных фазовых WL наблюдений «ровер – базовая станция», ввода всех тропосферных и ионосферных поправок в наблюдения, поправок на несовпадение фазовых центров антенн на двух частотах используется традиционная процедура взвешенного МНК– решения [12] навигационной задачи и расчета корреляционной матрицы погрешностей оцениваемых параметров.

### **3. Результаты экспериментального тестирования разработанного программно-алгоритмического комплекса высокоточного позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты**

Для отработки и натурального тестирования предложенных алгоритмов и процедур обработки GPS наблюдений были использованы несколько сеансов реальных кинематических наблюдений при проведении аэрофотосъемок на борту летательных аппаратов (вертолет, самолет) и наблюдения базовых станций. Ниже в качестве примера приводятся результаты обработки и анализа реальных наблюдений, предоставленных геодезической организацией ООО «ГЕОСКАНЕС» (г. Киев).

При проведении тестирования и исследований разработанных процедур обработки измерений выполнялись следующие действия.

1) GPS наблюдения подвергались предварительной обработке с использованием программного обеспечения «ОСТАВА» [7 – 9], которое позволило оценить качество кодовых и фазовых наблюдений, устранить циклические фазовые скачки, восстановить непрерывность фазовых наблюдений и т.д.

2) Выполнялась обработка наблюдений и были получены высокоточные (с сантиметровой точностью) эталонные оценки координат вертолета с использованием ПО «GrafNav/GrafNet» (NovAtel Inc./ Waypoint, Канада). На рис. 1 представлена эталонная траектория полета вертолета. Интервал наблюдений составил около 3,5 ч с темпом данных 1 Гц.

3) В ходе тестирования выполнялось разрешение фазовых неоднозначностей разностной частоты с использованием ЛК Melbourne-Wübbena методом формирования «виртуальных» двойных разностей.

4) Выполнялось «доразрешение» неоднозначностей, для которых предложенный способ обработки ЛК Melbourne-Wübbena не позволил достичь надежного решения задачи РФН.

5) После разрешения неоднозначностей выполнялось решение навигационной задачи с использованием однозначных фазовых WL наблюдений. Для компенсации ионосферной и тропосферной составляющих погрешностей использовались модели [10, 11].

6) Вычислялись отклонения (невязки) полученного WL решения от эталонного и рассчитывались статистические характеристики полученного решения.

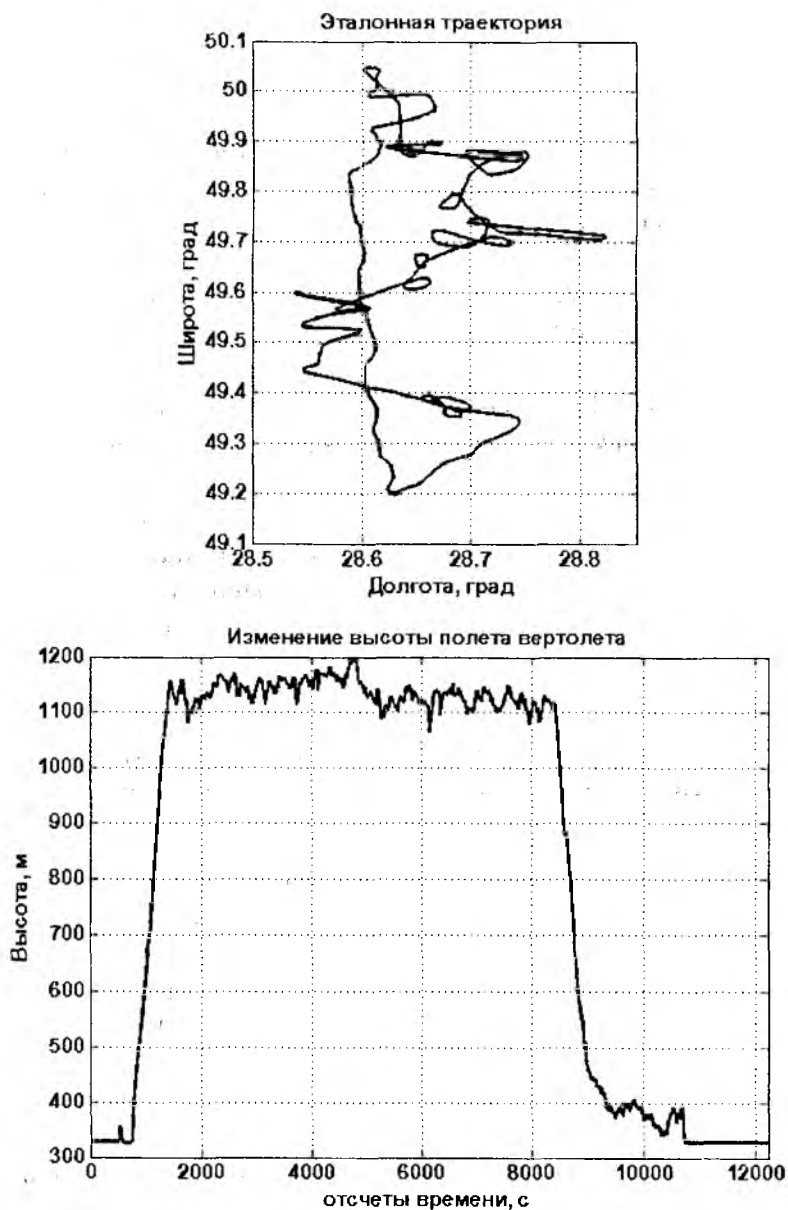
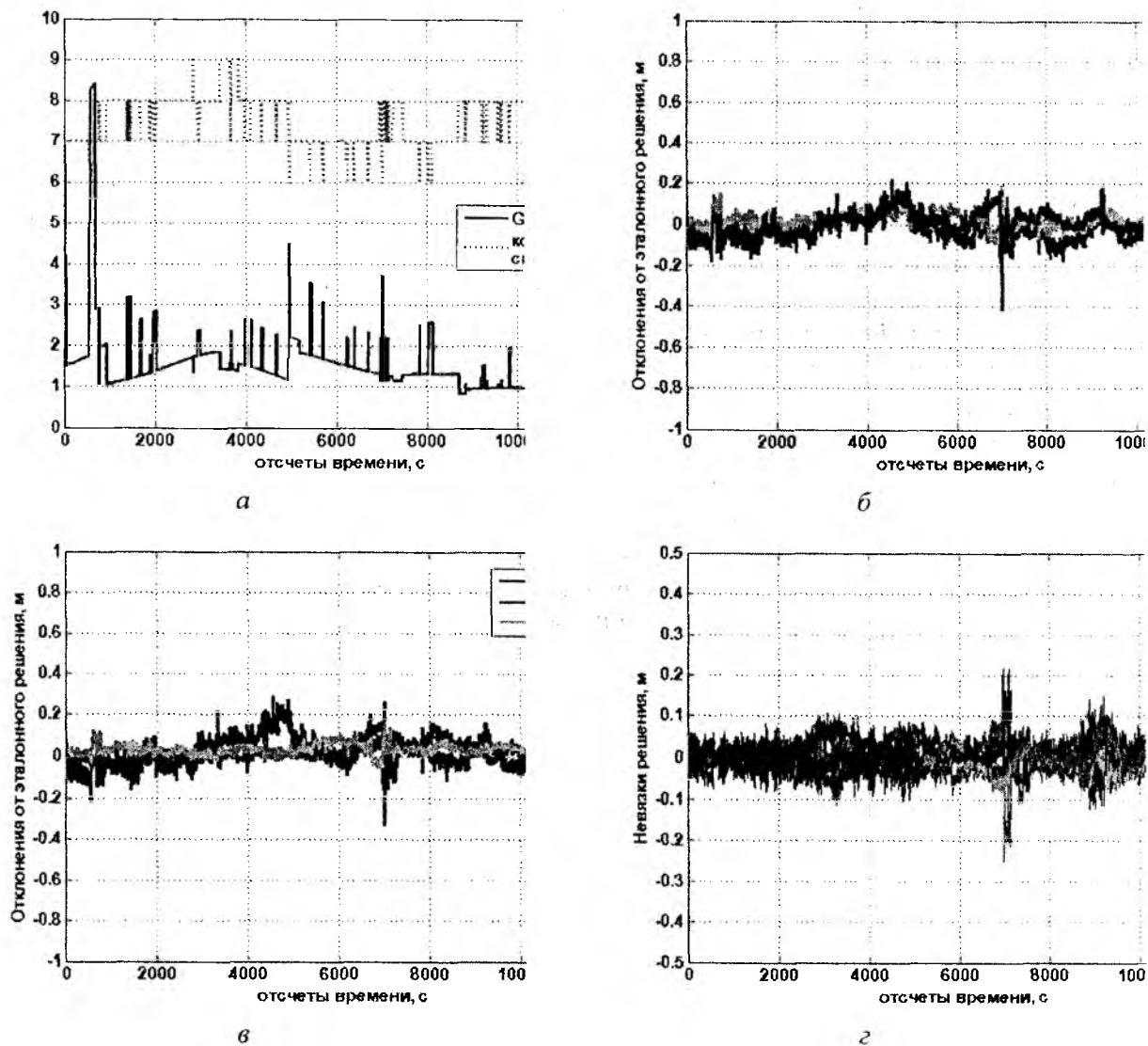


Рис. 1

На рис. 2 приведены отклонения полученного WL решения относительно эталонного по координатам X, Y, Z в гринвичской системе координат, а также для плановых координат в геодезической системе координат [12]. Также на рисунке приведено текущее количество видимых спутников и изменение геометрического фактора [1], а также невязки измеренных и расчетных (МНК – решение навигационной задачи) величин для каждого из спутников.



а – количество видимых спутников и геометрический фактор;  
 б – отклонения полученного решения от эталонного по координатам X, Y, Z;  
 в – отклонения полученного решения от эталонного по плановым координатам;  
 г – невязки полученного WL решения для каждого из спутников

Рис. 2

	X	Y	Z	N	E	H
$m_x, \text{ см}$	-2,58	2,9	0,3	1,9	3,7	0,9
$\sigma, \text{ см}$	4,5	3,1	5,9	4,1	2,3	6,8

$$m_x = \frac{1}{n} \sum y_i; \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (y_i - m_x)^2}$$

Подобные эксперименты были проведены для ряда сеансов кинематических и статических съемок. Выполненный обобщающий анализ потенциальных возможностей предложенного метода высокоточного позиционирования с использованием реальной измерительной информации показал, что при использовании фазовых WL наблюдений устойчиво достигается прак-

тически полное разрешение фазовой неоднозначности и субдециметровая точность (суммарное СКО оценивается на уровне 4 – 7 см) определения местоположения по всем трем координатам для кинематического режима съемки на базовых расстояниях до 200 – 300 км. В случае же статических определений суммарное СКО не превышает 1,5 – 2 см.

Таким образом, можно констатировать, что созданный отечественный алгоритмический и программный комплекс высокоточного позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты является конкурентоспособным надежным и высокоточным инструментарием обработки наблюдений и может быть рекомендован для практического внедрения и применения при решении широкого класса геоинформационных задач.

#### **4. Ограничения и возможности развития метода позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты**

Известными ограничениями рассмотренного метода позиционирования с использованием фазовых WL наблюдений являются меньшая точность координатных определений по сравнению с использованием исходных фазовых L1 и L2 наблюдений двух частот. Это обусловлено, во-первых, увеличенными (примерно в 4 раза) флуктуационными и многолучевыми составляющими погрешностей наблюдений ЛК WL и, во-вторых, необходимостью использования моделей для ионосферной коррекции, т.к. фазовая комбинация WL является, по существу, одночастотной. Использование же «безионосферных» комбинаций фазовых L1 и L2 наблюдений применить к наблюдениям WL напрямую невозможно, т.к. требует решить задачу РФН для наблюдений обеих частот, что является отдельной сложной задачей.

Большим достоинством использования однозначных WL наблюдений является обеспечение высокой надежности и исходности решения задачи РФН для фазовых L1 и L2 наблюдений, т.е. в определенном смысле можно рассматривать решение задачи РФН для WL наблюдений как промежуточное решение, позволяющее существенно ограничить неопределенность неоднозначности L1 и L2 наблюдений для достижения целочисленного финального решения, если это возможно. В случае невозможности получения целочисленного двухчастотного решения в практике используют либо WL решение, либо т.н. «плавающее» – float-решение, требующее накопление наблюдений на длительных интервалах времени. Кроме того, float-решение является во много раз менее точным, чем WL решение, в случае кинематических измерений.

Следует упомянуть и известное преимущество использования ЛК WL/MW для решения задач РФН практически на любых (до 4 тыс. км и даже более) базовых расстояниях, а также для обеспечения получения предварительного высокоточного решения методом PPP. Это достижимо за счет описанных выше особенностей ЛК MW и за счет важного свойства ЛК WL – эта комбинация свободна от влияния т.н. «wind-up» эффекта, характеризующегося дополнительным набегом фаз L1 и L2 наблюдений за счет перемещения спутников относительно приемной антенны GPS приемника (либо вращения антенны вокруг своей геометрической оси) [1].

Разработанный алгоритмический и программный комплекс высокоточного позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты имеет возможности дальнейшего усовершенствования и развития. В ходе дальнейших исследований планируется увеличить точность позиционирования за счет дополнительной фильтрации WL наблюдений с использованием L1 наблюдений, введения более точной модели погрешностей наблюдений и «весовой» их обработки, уточнения ионосферной модели и др. Ожидается, что эти меры позволят повысить точность позиционирования на десятки процентов.

#### **Заключение**

1. Предложены новая эффективная реализация и развитие дифференциального метода и алгоритмов высокоточного позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты. Разработанные алгоритмы и программные модули имеют ряд существенных отличительных особенностей, включая, универсальный метод разрешения фазовой

неоднозначности в однобазовом и многобазовом (сетевом) режимах как для статических, так и для кинематических наблюдений с формированием т.н. «виртуальных» двойных разностей наблюдений и оценки надежности и верификации решения.

2. Выполнены экспериментальное тестирование и исследования предложенного метода РФН с использованием реальной измерительной информации при проведении аэрофотосъемки на борту летальных аппаратов. Обобщающий анализ потенциальных возможностей предложенного метода высокоточного позиционирования с использованием реальной измерительной информации показал, что при использовании фазовых WL наблюдений устойчиво достигается практически полное разрешение фазовой неоднозначности и субдециметровая точность (суммарное СКО оценивается на уровне 4 – 7 см) определения местоположения по всем трем координатам для кинематического режима съемки на базовых расстояниях до 200 – 300 км. В случае же статических определений суммарное СКО не превышает 1,5 – 2 см.

3. Разработанный алгоритмический и программный комплекс высокоточного позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты имеет возможности дальнейшего совершенствования и развития. В ходе дальнейших исследований планируется увеличить точность позиционирования за счет дополнительной фильтрации WL наблюдений с использованием L1 наблюдений, введения более точной модели погрешностей наблюдений и «весовой» их обработки, уточнения ионосферной модели и др.

Таким образом, созданный отечественный алгоритмический и программный комплекс высокоточного позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты является конкурентоспособным надежным и высокоточным инструментарием обработки наблюдений и может быть рекомендован для практического внедрения и применения при решении широкого класса геоинформационных задач.

**Список литературы:** 1. *Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика* / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтнеггер, Д. Коллінз; пер. з англ. за ред. Я.С. Яцківа. Київ: Наук. думка, 1995. 380 с. 2. *Pre-Processing & Analysis software "OCTAVA\_PPA": concept, possibilities and features, initial test results* / Zhalilo A.A., Sadanova N.V. // *Proceedings of the 2004 International Symposium on GNSS/GPS (GNSS 2004)*, Sydney, Australia, 6–8 December 2004 (CD). 3. *Мониторинг геометрической конфигурации многобазисной сети широкозонной дифференциальной подсистемы космических навигационных систем NAVSTAR и ГЛОНАСС* / А.А. Жалило, С.Н.Флерко, А.И.Яковченко // *Космічна наука та технологія, НАКА і НАН України*. 1999. Т. 5, №1. 1999. С. 59-68. 4. *Long Baseline GPS Kinematic Positioning by Wide-Lane Combination* / Isshiki H. // *Conference Proceedings The Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 3, No.2004S-G2-10. 5. *An Application of Wide-Lane to Long Baseline GPS Measurements* / Isshiki H. // *ION GPS/GNSS 2003* pp 2129 – 2141. 6. *Желанов А.А.* Алгоритм и процедура верификации оценки целочисленных неоднозначностей фазовых GPS наблюдений разностной частоты // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб.* 2009. Вып. 158. С.43-52. 7. *Жалило А.А., Шелковенков Д.А.* «OCTAVA»: многофункциональный программный инструментарий обработки и анализа GPS/GNSS наблюдений // *Труды XIV-й Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам*. Санкт-Петербург, Россия, 28-30 мая 2007 г. С. 319-321. 8. *Шелковенков Д.А.* Контроль качества кодовых и фазовых GPS-наблюдений на этапе предварительной обработки // *Труды XIV-й Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам*. Санкт-Петербург, Россия, 28 – 30 мая 2007 г. С. 310-312. 9. *Features and service performance of multifunctional software toolkit "OCTAVA" for processing and analysis of GPS/GNSS observations* / Zhalilo A., Shelkovenkov D. / *GEOS 2007 Conference Proceedings*, Prague, Czech Republic, 1st – 2nd March 2007, pp. 102-110. 10. *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*, RTCA/DO-229C, November 28, 2001. 11. «IONEX: The IONosphere maps EXchange format Version 1» // Stefan Schaer, Werner Gurtner / <ftp://igschb.jpl.nasa.gov/igschb/data/format/ionex1.ps> 12. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио, 1978. 350 с.