

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИСТЕМ ТИПА ГЛОНАСС ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ В НАВИГАЦИОННЫХ ЗАДАЧАХ

М. А. Артемов, Д. Е. Кочкин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 02.11.2010 г.

Аннотация: В статье рассмотрено использование фазовых измерений навигационных систем типа ГЛОНАСС для повышения точности измерений в ряде задач. Рассмотрены основные понятия и модели, используемые при работе с фазовыми измерениями. Приведены алгоритмы предварительной обработки измерений и определения неоднозначностей. Приведены результаты вычислительных и натурных экспериментов по исследованию разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: спутниковая навигация, фазовые измерения.

Annotation: The article considers usage of phase measurements of navigation systems like GLONASS for increase of measurement accuracy in some problems. Basic definitions and models are considered. The algorithms for measurement preprocessing and ambiguities determination are described. The results of research experiments on developed algorithms are given.

Keywords: satellite navigation, phase measurements.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее широко применяемым решением для различных задач геопозиционирования являются спутниковые навигационные системы (СНС), в частности, системы ГЛОНАСС и GPS. К факторам, обусловившим популярность этих систем, можно отнести зону действия, простоту интеграции и соотношение цена/качество. Основные преимущества автоматически вытекают из архитектуры СНС. В частности, простота интеграции обусловлена пассивным режимом работы навигационных приемников, а практически повсеместное покрытие обеспечивается геометрией созвездия спутников.

Решение большинства типичных задач, требующих использования навигационных приемников, уже реализовано в программном и аппаратном обеспечении приемника. Примером такой задачи является задача определения географического местоположения, заключающаяся в определении широты и долготы потребителя. Однако ряд прикладных задач либо совсем не решается приемниками, либо точность получаемого решения оказывается недостаточной. Примером такой задачи является задача определения ориентации объекта. Фак-

тически СНС решают только задачу определения направления движения объекта, которое в ряде случаев не совпадает с ориентацией объекта. Кроме того, предоставляемое решение находится по разности координат для различных временных эпох, а значит, отстает от реального значения как минимум на 1,5 секунды.

Преодоление перечисленных проблем, а также повышение точности решения, становится возможным при использовании следующего подхода: вместо одного приемника используются два, кроме того программное обеспечение приемника должно обеспечивать возможность выдачи потребителю фазовых измерений (более подробно об измерениях приемников СНС см. [1, 2]).

В данной статье рассматриваются общие принципы применения фазовых измерений для повышения точности. Рассматриваемые модели подходят как для отечественной системы ГЛОНАСС, так и для американской системы GPS. В основном эти модели представляют интерес при рассмотрении одночастотных приемников, т.к. для многочастотных приемников возможно применение других моделей, работа с которыми представляется более удобной. Приводимые результаты получены в течение нескольких лет работы автора с приемниками Novatel SuperStar II и в большей степени ха-

рактены для недорогих доступных навигационных приемников.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МОДЕЛИ

Рассмотрим используемые математические модели.

Пусть есть два спутниковых приемника: s и r (рис. 1). Предполагается, что длина вектора базовой линии не превышает 10 км.

Введем следующие обозначения:

$\mathbf{h}_s^i, \mathbf{h}_r^i$ — вектор от приемника $s(r)$ к спутнику i ;

\mathbf{e}^i — единичный вектор от средней точки базовой линии к спутнику i ;

ρ_s^i, ρ_r^i — расстояние от приемника $s(r)$ до спутника i ;

λ^i — длина волны на частоте спутника i ;

\mathbf{x} — вектор между приемниками.

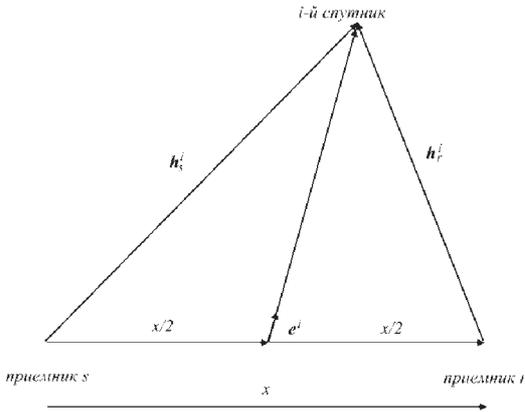


Рис. 1. Геометрическая модель задачи оценки относительного положения

Из геометрического соотношения сторон треугольника имеем:

$$\mathbf{x} = \mathbf{h}_s^i - \mathbf{h}_r^i. \quad (1)$$

Введем обозначение

$$\mathbf{e}^i = \frac{\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x} / 2}{\|\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x} / 2\|} = \frac{\mathbf{h}_s^i + \mathbf{h}_r^i}{\|2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|},$$

откуда $\|2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\| \mathbf{e}^i = \mathbf{h}_s^i + \mathbf{h}_r^i$.

Умножаем обе части справа на уравнение (1) получаем:

$$\begin{aligned} (\|2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\| \mathbf{e}^i)^T \mathbf{x} &= \\ &= \|\mathbf{h}_s^i\|^2 - \|\mathbf{h}_r^i\|^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Разложим правую часть уравнения (2.2) на множители:

$$\begin{aligned} (\|\mathbf{h}_s^i\| - \|\mathbf{h}_r^i\|) \cdot (\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_r^i\|) &= \\ = \lambda^i (\rho_s^i - \rho_r^i) \cdot (\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|). \end{aligned} \quad (3)$$

Введем следующую величину:

$$\omega^i \equiv \frac{\|2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|}{\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|}. \quad (4)$$

Тогда из (2), (3) и (4) получаем:

$$(\omega^i \mathbf{e}^i)^T \mathbf{x} = \lambda^i (\rho_s^i - \rho_r^i). \quad (5)$$

Оценим порядок весового коэффициента ω^i из уравнения (4). Учтем, что $\|\mathbf{h}_s^i\| \approx 2 \cdot 10^7$ м, $\|\mathbf{h}_r^i\| \approx 2 \cdot 10^7$, $\|\mathbf{x}\| \leq 10^4$.

$$\begin{aligned} \omega^i &= \frac{\|2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|}{\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|} \leq \\ &\leq \frac{2\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{x}\|}{\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_r^i\|} \approx \\ &\approx \frac{4 \cdot 10^7 + 10^4}{4 \cdot 10^7} = 1,00025. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, в нашей задаче можно полагать весовой коэффициент равным 1.

В случае задачи определения ориентации приемники действительно располагают на малом расстоянии. Расстояние выбирают максимально большим, но при этом должна сохраниться физическая возможность разместить два приемника на одном носителе. Максимизация расстояния необходима потому, что погрешность оценки ориентации обратно пропорциональна расстоянию между приемниками.

Под *фазовым измерением* в спутниковой навигации понимают измерение фазы полученного сигнала спутника относительно фазы частоты опорного генератора приемника в момент приема сигнала. Фазовые измерения могут быть выполнены с высокой точностью (аппаратная погрешность составляет от нескольких миллиметров до единиц сантиметров). Недостатком фазовых измерений является то, что в момент захвата сигнала число полных периодов несущей частоты между спутником и приемником не может быть определено. Неопределенное целое число циклов для фазового измерения называют *неоднозначностью*. Определение целочисленных неоднозначностей является ключевой проблемой при работе с фазовыми измерениями.

Рассмотрим одну из наиболее часто используемых моделей фазовых измерений (см., например, [3, 4]):

$$\varphi_s^i(t_k) = \rho_s^i(t_k) - I_s^i(t_k) + T_s^i(t_k) + N_s^i + f^i[\delta t_s(t_k) - \delta t^i(t_k - \tau_s^i)] + \mu_s^i(t_k). \quad (7)$$

Здесь t_k — время поступления сигнала от спутника i на приемник s , τ_s^i — время прохождения сигнала от спутника i до приемника s , $\varphi_s^i(t_k)$ — измерение фазы несущей сигнала в момент времени t_k , $\rho_s^i(t_k)$ — расстояние между приемником s в момент времени t_k и спутником i в момент времени $t_k - \tau_s^i$, $I_s^i(t_k)$ — ионосферная ошибка дальности в момент времени t_k , $T_s^i(t_k)$ — тропосферная ошибка дальности в момент времени t_k , N_s^i — целочисленная неоднозначность, f^i — несущая частота сигнала спутника i , $\delta t_s(t_k)$ — ошибка часов приемника в момент времени t_k , $\delta t^i(t_k - \tau_s^i)$ — ошибка часов спутника в момент времени $t_k - \tau_s^i$, $\mu_s^i(t_k)$ — погрешность измерения фазы несущей сигнала, включая ошибки многолучевого распространения, в момент времени t_k .

Определение некоторых параметров в уравнении (7) представляет собой существенную сложность. Т.к. расстояние между приемниками мало, то тропосферные и ионосферные ошибки дальности совпадают (это верно на расстоянии до 10 км). Также идентичными для обоих приемников являются ошибки часов спутника. Таким образом, можно вычесть из уравнения (1) для приемника s уравнение (7) для приемника r и перейти к первым фазовым разностям:

$$\begin{aligned} \varphi_s^i(t_k) - \varphi_r^i(t_k) &= \\ &= \rho_s^i(t_k) - \rho_r^i(t_k) + N_s^i - N_r^i + \\ &+ f^i \delta t_s(t_k) - f^i \delta t_r(t_k) + \mu_s^i(t_k) - \mu_r^i(t_k). \end{aligned} \quad (8)$$

Можно заметить, что индексы приемников s и r присутствуют у каждого из неизвестных уравнения, так что далее мы опустим эти индексы, а временную эпоху будем отмечать индексом k . Таким образом, полагая, что:

$$\begin{aligned} \varphi_k^i &\equiv \varphi_s^i(t_k) - \varphi_r^i(t_k), \\ N^i &\equiv N_s^i - N_r^i, \\ \mu_k^i &\equiv \mu_s^i(t_k) - \mu_r^i(t_k), \\ \beta_k^i &\equiv f \delta t_s(t_k) - f \delta t_r(t_k) \end{aligned}$$

из (5), (6) и (8) получаем модель первых разностей фазовых измерений:

$$\varphi_k^i = \left(\frac{\mathbf{e}_k^i}{\lambda^i} \right)^T \mathbf{x}_k + N^i + \beta_k^i + \mu_k^i. \quad (9)$$

Обычно удобным оказывается переход от первых разностей ко вторым, т.к. ошибка часов приемника β_k^i зависит от времени и не может быть определена. Для этого из всех спутников, присутствующих на небосводе, выбирается тот, который имеет наибольшее склонение. Такой спутник называют ведущим (hub). Без ограничения общности далее будем полагать его индекс нулевым. Для разных спутников члены β_k^i будут одинаковыми, что позволит избавиться от этих неизвестных в уравнениях (9), вычитанием строки измерений, соответствующей ведущему спутнику. Т.к. в системе ГЛОНАСС у каждого из спутников своя частота, необходимо привести уравнения к одинаковым единицам измерения, для этого обе части уравнений умножаются на длину волны ведущего спутника λ^0 . В результате получаем систему уравнений для вторых разностей измерений в следующем виде:

$$\Delta \varphi_k^j = \Delta \mathbf{E}_k^j \mathbf{x}_k + \Delta N^j + \Delta \mu_k^j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (10)$$

где $\Delta \varphi_k^j = \lambda^0(\varphi_k^0 - \varphi_k^j)$ — вторая разность фазовых измерений; $\Delta \mathbf{E}_k^j = \mathbf{e}_k^0 - \mathbf{e}_k^j \frac{\lambda^0}{\lambda^j}$ — разность направлений на спутники; \mathbf{x}_k — вектор базовой линии в задаче оценки относительного положения; $\Delta N^j = \lambda^0(N^0 - N^j)$ — вторая разность неоднозначностей фазовых измерений; $\Delta \mu_k^j = \lambda^0(\mu_k^0 - \mu_k^j)$ — вторая разность погрешностей фазовых измерений.

Таким образом, используемая модель вторых разностей фазовых измерений (10) является основной моделью, применяемой для повышения точности.

ПРИМЕРЫ ПЕРВЫХ И ВТОРЫХ РАЗНОСТЕЙ

На рис. 2 приведен пример первых разностей для двух приемников.

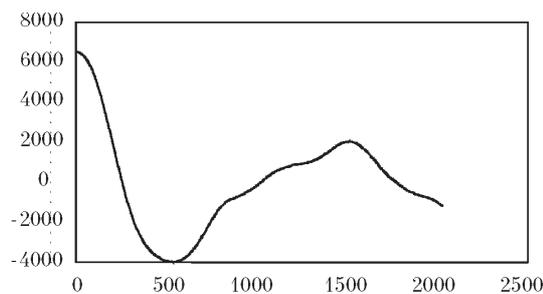


Рис. 2. Первые разности по двум приемникам. Ось абсцисс — время, секунд, ось ординат — первые разности, длины волн.

В идеале первые разности должны быть линейными по времени, но мы видим, что это не так. Происходит это вследствие нестабильной работы генераторов приемников, а также многолучевости сигнала (отражение от близлежащих объектов, экранирование). Поэтому на их основе не получится провести точных вычислений. Основные вычисления проводятся на основе вторых разностей, так как их вид предсказуем. Однако и вторые разности содержат ряд недостатков, которые необходимо корректировать (см. рис. 3). В частности, такими недостатками являются наличие шумов и явление пропуска фазы (скачки на графике), обусловленные неточной работой программного обеспечения приемника.

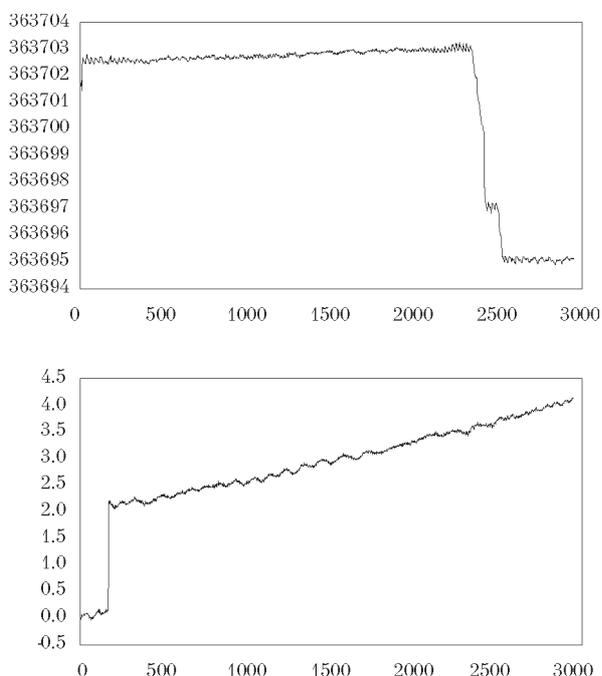


Рис. 3. Вторые разности фазовых измерений. Вверху 29 спутник, внизу 3 спутник. Ось абсцисс — время, секунд, ось ординат — вторые разности, длины волн.

ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ

Для использования фазовых измерений, требуется уметь находить целочисленные неоднозначности.

В работе [5] рассмотрено применение метода полного перебора для определения неоднозначностей и показана практическая неприменимость этого метода ввиду NP-полноты задачи.

В современной литературе ([6, 7]) по оценке относительного положения в качестве одного из методов сокращения пространства перебора часто используется так называемый LAMBDA-метод (least-squares ambiguity decorrelation adjustment). Он состоит в следующем.

Полагаем, что значения неоднозначностей считаются вещественными. Накапливаем данные измерений за небольшой интервал времени (10—15 минут). При этом в течение этого интервала времени подвижный приемник должен находиться на месте, чтобы значения вторых разностей неоднозначностей и базовой линии не менялись в течение этого интервала времени. Далее по методу наименьших квадратов определяются искомые неизвестные.

Данный алгоритм приводит к хорошим результатам на математических моделях, в которых шумы распределены в соответствии с нормальным распределением, однако результаты его проверки на реальных данных показали, что получаемые результаты адекватны далеко не всегда ([8, 9]). Таким образом, необходимо осуществлять предварительную обработку исходных вторых разностей.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Как уже было сказано, вторые разности необходимо предварительно обрабатывать. Рассмотрим один из алгоритмов предварительной обработки, основанный на линейной аппроксимации и фильтрации Калмана.

Шаг 1: Выбирается некоторый промежуток, на котором мы пытаемся построить линейную аппроксимацию (использовался интервал около 120 секунд).

Шаг 2: При построении аппроксимации отфильтровываются все значения вторых разностей, которые отклоняются от нее более чем на некоторое пороговое значение (использовалось значение порядка $1/4$ длины волны). Если не удалось построить аппроксимацию на данном отрезке, то его начало смещается на заданное число (четверть отрезка).

Шаг 3: Запускается фильтр Калмана, с помощью которого контролируется дальнейшее изменение вторых разностей. Фильтр Калмана осуществляет коррекцию аппроксимации следующим образом ([10-12]):

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}^- + \mathbf{R}\mathbf{E}_k^T (\mathbf{E}_k\mathbf{R}^{-1}\mathbf{E}_k^T + \mathbf{Q})^{-1} (\varphi_k^i - \hat{\varphi}_{k-1}^i)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}^- \mathbf{E}_k^T (\mathbf{E}_k\mathbf{R}^{-1}\mathbf{E}_k^T + \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{E}_k\mathbf{R}^-$$

где \mathbf{X}^- — предыдущее значение вектора линейной аппроксимации; \mathbf{R}^- — ковариационная матрица на предыдущем шаге; φ_k^i — текущее значение второй разности по рассматриваемому каналу; $\hat{\varphi}_{k-1}^i$ — значение второй разности, рассчитанное с помощью коэффициентов фильтра Калмана, полученных на предыдущем шаге ($\hat{\varphi}_{k-1}^i = X_0^- + X_1^- t$); \mathbf{X} и \mathbf{R} — откорректированные значения вектора линейной аппроксимации и ковариационной матрицы соответственно; \mathbf{Q} — корреляционная матрица шумов (в нашем случае она постоянна и равна единичной матрице); \mathbf{H} — вектор $[1, k]$, k — текущая эпоха.

Критерий обнаружения сбоя в работе аппаратуры приемника, определяемый с помощью фильтра — разность между предсказанным значением и реальным больше, чем половина длины волны.

В качестве начального значения вектора \mathbf{X} берется вектор построенной нами аппроксимации. Начальная ковариационная матрица $\mathbf{R} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$, где $\mathbf{H} = [\mathbf{I}, \mathbf{t}]$ (\mathbf{I} — единичный вектор, \mathbf{t} — вектор относительного времени).

Шаг 4: При обнаружении сбоя мы пытаемся построить новую аппроксимацию на отрезке прежней длины, начиная с точки сбоя. Построив ее, мы рассматриваем угол, под которым находятся две полученные нами аппроксимации друг к другу. В случае если он превышает $\frac{\lambda}{2L}$, где λ — длина волны, а L — длина отрезка, на котором строится аппроксимация, то все точки той из них, угол наклона которой больше, удаляются. Иначе мы разбиваем весь временной промежуток вычислений на несколько отрезков (на каждом — своя аппроксимация). Значения вторых разностей на них будут различаться некоторыми близкими друг к другу, почти целыми числами.

Шаг 5: Если в результате процесса образовалось несколько отрезков, то их все, начиная с первого необходимо выровнять с последним (в случае если разность значений близка к целым).

Результаты работы алгоритма фильтрации отражены на рис. 4 (ср. с рис. 3).

После предварительной обработки осуществляется определение целочисленных неоднозначностей по методу, описанному выше.

ОТСЛЕЖИВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ

При этом неоднозначности становятся известными и можно отслеживать движение при-

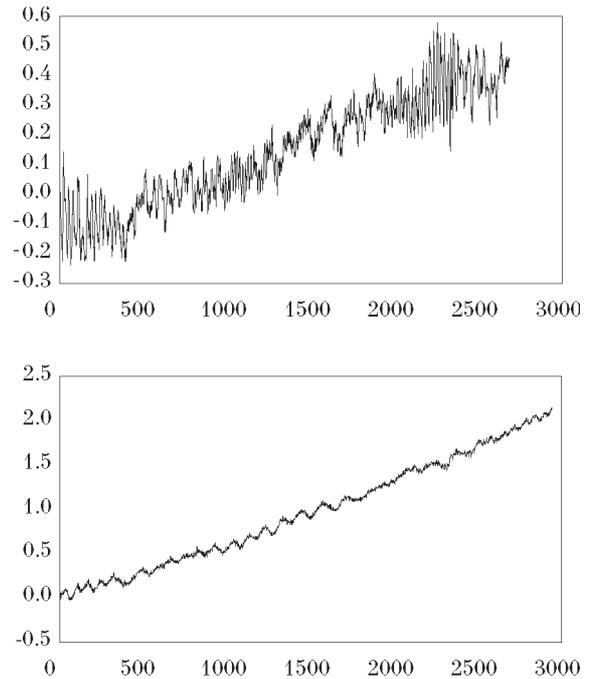


Рис. 4. Вторые разности фазовых измерений после предварительной обработки данных. Вверху 29 спутник, внизу 3 спутник. Ось абсцисс — время, секунд, ось ординат — вторые разности, длины волн.

емников. Для этого каждую секунду решается система, аналогичную (10), но для каждого канала будем иметь данные только за одну секунду и пользоваться неоднозначностями, вычисленными в режиме определения неоднозначностей. Вычисления осуществляются по следующему алгоритму:

Шаг 1: Получаем данные от двух приемников за 1 секунду. Отсеиваем спутники, удаляющиеся из поля видимости, и определяем текущий ведущий спутник.

Шаг 2: Для ведущего спутника определяем вторые разности по наблюдаемым каналам и орты координат спутников, формируя таким образом систему уравнений для определения разностей координат антенн в данную секунду.

Шаг 3: Решаем систему. Вычисляем невязку по каждому спутнику и норму невязки по всем спутникам сразу.

Шаг 4: Если невязка по правой части получилась больше заданного порогового значения (использовалось значение около 0.25), то делаем вывод, что по одному из каналов произошел сбой (он мог прекратить вещание на довольно длительный промежуток, а потом вновь появиться; также мог произойти «перескок фазы»).

Шаг 5: В этом случае последовательно решаем систему, на каждом шаге отбрасывая данные по одному из спутников и заново вычисляя его неоднозначность. По невязке правой части определяем канал, по которому произошел сбой и оптимальное решение в данную секунду.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Были выполнены исследования вторых разностей фазовых измерений в реальных данных. Проведенный анализ невязки второй разности и ее линейной аппроксимации показал наличие периодических составляющих с периодом от 50 до 120 секунд (см. график автокорреляционной функции на рис. 5). Полученные результаты учтены при осуществлении предварительной обработки фазовых измерений. Кроме того известные алгоритмы определения неоднозначностей оказались не применимы, т.к. исходят из предположения, что погрешности распределены по нормальному закону. При исследовании алгоритма определения целочисленных неоднозначностей, была выполнена оценка возможного пространства перебора при определении неоднозначностей. Показано, что достаточным будет диапазон ± 1 для каждого из элементов вектора неоднозначностей. Оценка получена математическим моделированием и подтверждена натурными экспериментами. Для оценки возможного влияния вычислительных погрешностей и немоделируемых компонент моделей получены величины обусловленностей основных вычислительных задач как числа обусловленности линейных операторов в системе (10). Полученные результаты (см. рис. 6) позволяют сделать вывод, что указанные составляющие не вносят существенной погрешности в результат.

Был проведен вычислительный эксперимент по исследованию характеристик разработанного алгоритма обработки вторых разностей. Были исследованы следующие вопросы:

1. Возможность успешной работы алгоритма в зависимости от характеристик погрешностей, интервала накопления данных и количества спутников.

2. Влияние погрешностей на точность при отслеживании движения.

3. Оценка точности получаемого решения.

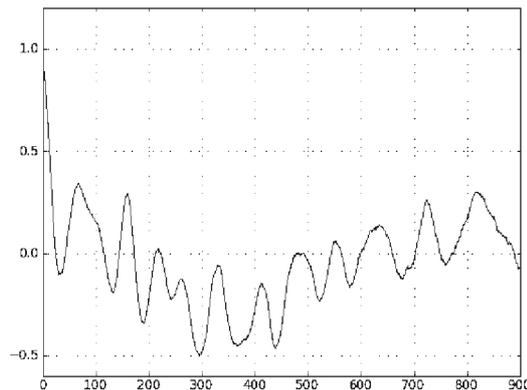


Рис. 5. График автокорреляционной функции невязки второй разности и ее линейной аппроксимации по 300 с интервалам. Ось абсцисс — время, секунды. Ось ординат — коэффициент корреляции.

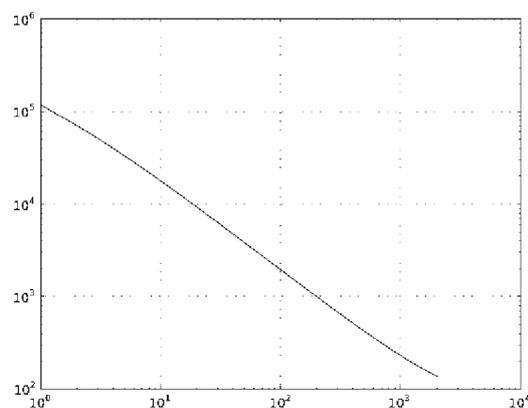


Рис. 6. Оценка зависимости числа обусловленности матрицы коэффициентов от времени при неизвестных неоднозначностях. Ось абсцисс — время, секунды. Ось ординат — число обусловленности. Логарифмическая шкала.

4. Оценка влияния ошибки определения неоднозначностей на точность решения.

Основным критерием успешности работы алгоритма является правильное определение вторых разностей неоднозначностей фазовых измерений. Работа алгоритма считается успешной, если определяемые и эталонные значения неоднозначностей полностью совпадают. Исследование проведено следующим образом: на основе эфемерид моделировались характерные созвездия спутников и соответствующие измерения, после чего моделировались различные погрешности, как характерные для реальных измерений, так и превышающие их по интенсивности. Моделирование погрешностей выполнено по следующей формуле:

$$\Delta\mu_k = A_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \varphi_k^1\right) + A_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_2} + \varphi_k^2\right) + \eta(t). \quad (11)$$

В правой части уравнения (11) первой слагаемое — короткопериодическая составляющая, второе слагаемое — длиннопериодическая составляющая, третье слагаемое — случайная шумовая величина, распределенная по нормальному закону. При моделировании в качестве короткого периода использовалось значение 50 с, в качестве длинного — период 2 ч. Амплитуда шумовой величины устанавливалась на уровне 0,05 длины волны (1 см). Типичные значения амплитуды периодических составляющих — 0,1 длины волны (2 см) для обеих периодических составляющих.

Получены следующие результаты.

Характеристики погрешностей. Установлено, что при моделировании периодических составляющих погрешностей максимальными значениями амплитуды, при которых сохраняется работоспособность алгоритма, являются значения 0,2 длины волны (4 см).

Интервал накопления данных. На типичных амплитудах погрешностей верные значения неоднозначностей получаются через 4—5 минут. Для максимальных значений амплитуды погрешностей корректные результаты получаются за 13 минут. Учитывая, что в экспериментах использованы данные, записанные в достаточно хороших условиях, окончательно в работе предлагается использовать значение интервала в 15 минут, позволяющее получить достаточное количество данных для учета негативных факторов.

Число спутников. Для моделирования пропадания спутников составлена карта созвездия спутников. На карте отмечены области вероятного местоположения спутников на протяжении интервала исследования (15 минут). Выполнено моделирование экранирования части спутников препятствиями (исследованы случаи с 4, 5 и 6 спутниками). Установлено, что для 4 и 5 спутников алгоритм оказывается неработоспособным. Таким образом, для успешного определения неоднозначностей необходимо не менее 6 спутников при интервале накопления данных 15 минут.

Для оценки работы алгоритма в режиме отслеживания движения исследовано влияние

погрешностей на точность оценки базовой линии. Результаты получены моделированием вторых разностей на основе уравнения (10). Установлено, что при переходе алгоритма в режим отслеживания движения, влияние погрешностей носит линейный характер в соответствии с формулой (10).

Выполнена оценка точности получаемого решения при известных неоднозначностях, составившая 5 мм для горизонтальных координат и 1 см для вертикальных координат.

Оценено влияние ошибки при определении неоднозначностей на точность оценки базовой линии. Теоретическая оценка ошибки сверху составляет от 1,5 длин волн для одной до 2,5 длин волн для трех ошибочно определенных неоднозначностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. — М.: ИПРЖР, 1998. — 400 с.
2. *Hoffmann-Wellenhof B.* Global Positioning System: Theory and Practice. 5th edition / В Hoffmann-Wellenhof, Н. Lichtenegger, J. Collins. — Springer, New York, USA. — 2004. — 382 p.
3. *Харисов В.Н.* Фильтрация относительных координат в СРНС ГЛОНАСС с использованием фазовых измерений: подход на основе сигнального времени. / В.Н. Харисов, Н.Т. Булавский // «Радиотехника». — 1999. — № 7. — С. 83-89.
4. *Chang X.-W.* Code and Carrier Phase Based Short Baseline GPS Positioning: Computational Aspects. / X.-W. Chang, C.C. Paige, L. Yin // GPS Solutions, №7. — 2004. — pp. 230-240.
5. *Артемов М.А.* Сокращение пространства перебора при решении задачи относительного местоположения дифференциальными методами / М.А. Артемов, Д.Е. Кочкин, И.Б. Крыжко // Авиакосмические технологии “АКТ-2007”: труды VIII Всероссийской с международным участием научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Воронеж, 12-14 сентября 2007 г.). — Воронеж, 2007. — С. 338-344.
6. *Chang X.-W.* MLAMBDA: A Modified LAMBDA Method for Integer Least-squares Estimation. / X.-W. Chang, X. Yang, T. Zhou // Journal of Geodesy, № 79. — 2005. — pp. 552-565.
7. *Teunissen P.J.G.* A canonical theory for short GPS baselines. / P.J.G. Teunissen // Journal of Geodesy, № 71. — 1997. — Part I: The baseline precision, pp. 320-336. Part II: The ambiguity precision, pp. 389-401. Part III: The geometry of the ambiguity search space, pp. 486-501. Part IV: Precision versus reliability, pp. 513-525.

8. *Кочкин Д.Е.* Универсальная модель задач с фазовыми измерениями для системы ГЛОНАСС и GPS. // Кибернетика и высокие технологии XXI века. Труды IX международной научно-технической конференции. Т.2. — Воронеж: ВГУ. — 2008. — С. 747-751.

9. *Кочкин Д.Е.* Использование Lambda-метода для быстрого нахождения целочисленных неопределенностей / Д. Е. Кочкин, М. А. Артемов, И. Б. Крыжко // Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика 2007). Международная научно-техническая конференция и Российская научная школа молодых ученых и специалистов: материалы Международной конференции и Российской научной школы — М., 2007. — Ч. 2, Т. 2. — С. 55-59.

Артемов Михаил Анатольевич — заведующий кафедрой программного обеспечения и администрирования информационных систем факультета ПММ. Тел.: : 208-337, 8-908-146-30-54; e-mail: artemov_m_a@mfil.ru

Кочкин Дмитрий Евгеньевич — аспирант кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем факультета ПММ. Тел.: 208-337

10. *Артемов М.А.* Использование сглаживания кодовых измерений сигналов СРНС типа NAVSTAR / М.А. Артемов, И.Б. Крыжко, Д.Е. Кочкин // Черноземный альманах научных исследований. Сер. Прикладная математика и информатика. — Воронеж, 2006. — Вып. 1(2). — С. 9-14.

11. *Крыжко И.Б.* Совместное использование фазовых и кодовых измерений сигналов СРНС типа NAVSTAR / И.Б. Крыжко, М.А. Артемов, Д.Е. Кочкин // Авиакосмические технологии “Акт -2006”: труды седьмой международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов г. Воронеж, 13-15 сентября 2006. — Воронеж, 2006. — С. 556-562.

12. *Kalman R.E.* A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. / R.E. Kalman // Journal of Basic Engineering (ASME), Vol. 82D. — 1960.

Artemov M. A. — Professor, Head of the dept. of Software and Information System Administration Chair, Voronezh State University. Tel.: 208-337, 8-908-146-30-54; e-mail: artemov_m_a@mfil.ru

Kochkin D. E. — Graduate of the dept. of Software and Information System Administration, Voronezh State University. Tel.: 208-337