

УДК 621.396

Высокоточное местоопределение в абсолютном режиме в ГНСС с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений

А.Н. Подкорытов

Аннотация

В статье рассмотрено использование процедуры разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений при высокоточном определении координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) в абсолютном режиме. Описаны условия, при которых возможна реализация указанной процедуры в абсолютном режиме. Приведены результаты вычислительных экспериментов по высокоточному местоопределению потребителя в ГНСС с использованием целочисленного разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений, демонстрирующие существенное снижение периода сходимости и повышение точности по сравнению с аналогичной обработкой без процедуры разрешения. В качестве необходимых продуктов сетевого решения использованы данные Министерства природных ресурсов Канады (Geodetic Survey Division, Earth Sciences Sector, Natural Resources Canada).

Ключевые слова: ГНСС; высокоточное местоопределение; псевдофазовые измерения; разрешение неоднозначности; целочисленная неоднозначность; PPP; Integer PPP.

Введение

В последние годы в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) активно развивается высокоточное определение координат потребителя (высокоточное местоопределение, VM) в абсолютном режиме. На сегодняшний день точность таких

определений в режиме послесекундной обработки достигает 1см в режиме статики [1, 2] и нескольких дециметров для подвижного потребителя.

На рисунке 1 приведена классификация основных технологий местоопределения в ГНСС. Еще несколько лет назад можно было четко отделить абсолютный режим местоопределения от относительного (дифференциального). В последние несколько лет активно развивались технологии использования высокоточных неоднозначных псевдофазовых измерений [3, 4]. В настоящее время можно говорить о глобальных дифференциальных навигационных спутниковых системах. В таких системах можно выделить сетевое решение, которое осуществляется по сети наземных станций, как правило, глобальной или региональной, т.е. имеет признаки дифференциального режима; также можно выделить пользовательское решение, т.е. ВМ потребителя в абсолютном режиме без использования измерений от опорных станций. Однако такое ВМ возможно лишь при использовании продуктов сетевого решения, сформированных по сети наземных станций. Для режима классического ВМ, который в зарубежной литературе называется PPP, такими продуктами является высокоточная эфемеридно-временная информация (ЭВИ). Для режима ВМ с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений, называемого в зарубежной литературе Integer PPP, эта ЭВИ должна обладать особыми свойствами, предполагающими целочисленную природу неоднозначностей псевдофазовых измерений.

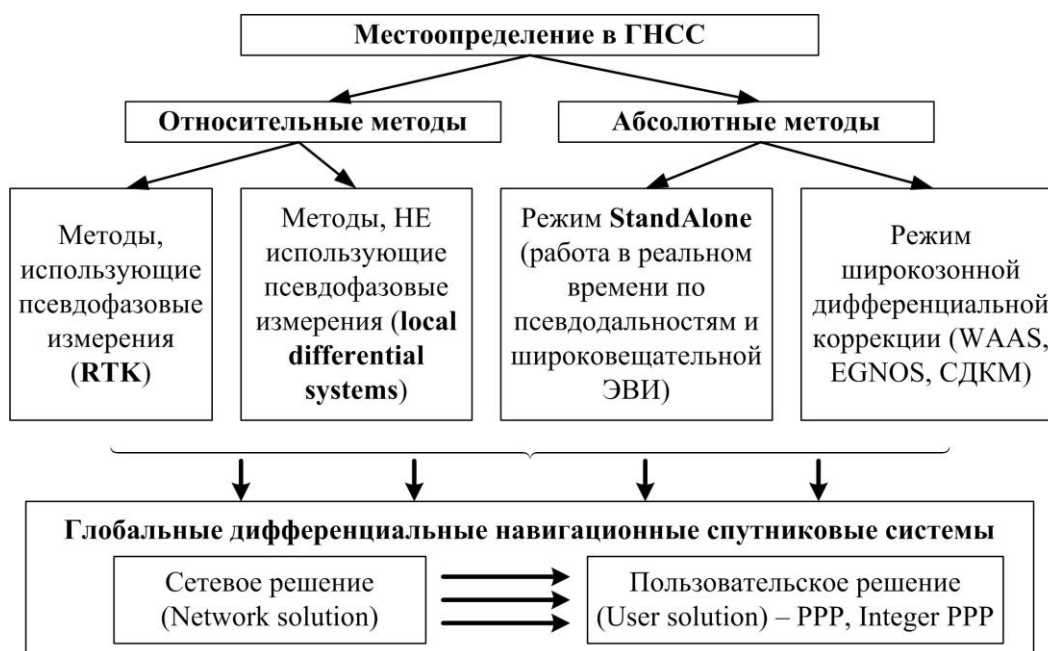


Рисунок 1. Классификация технологий местоопределения в ГНСС.

В данной статье приводится модель измерений, которая позволяет отделить немоделируемые аппаратурные смещения от целочисленной неоднозначности в измерениях

псевдофазы. Это дает возможность использовать целочисленную природу псевдофазовых неоднозначностей и реализовать процедуру целочисленного разрешения при ВМ в абсолютном режиме. В результате период сходимости (время обработки измерений, требуемое для получения местоположения с заданной точностью) существенно сокращается, а точность существенно повышается по сравнению с обычным режимом ВМ (PPP или Float PPP). Приведенные в статье результаты получены при использовании продуктов сетевого решения, сформированных Министерством природных ресурсов Канады (Geodetic Survey Division, Earth Sciences Sector, Natural Resources Canada, NRCan).

Целью данной работы является иллюстрация успешного применения процедур целочисленного разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений при ВМ в ГНСС в абсолютном режиме.

Классический режим ВМ (PPP или Float PPP)

В хорошо развитом в настоящее время классическом режиме ВМ (PPP или Float PPP) неоднозначности оцениваются как действительные числа, вбирая в себя ряд немоделируемых смещений в исходных измерения [1, 2, 4]. В [1] приведены точностные характеристики для нескольких сервисов ВМ и алгоритма, разработанного автором. По представленным зависимостям средних 3-х мерных ошибок определения координат от длительности интервала измерений хорошо видно, что точность местоопределения 1-3см доступна после 6-12 часов обработки измерений. При этом финальная ЭВИ от Международной ГНСС службы (International GNSS Service, IGS), обеспечивающая указанную точность местоопределения, доступна только через 2 недели после проведения измерений. Такое время ожидания является неприемлемым для ряда практических приложений. Как показано в [2], прогнозная ЭВИ, доступная в реальном времени, обеспечивает существенно худшую точность местоопределения.

Сегодня усилия ведущих исследователей и научных организаций в области абсолютной высокоточной спутниковой навигации сосредоточены на уменьшении периода сходимости. С этой целью в процессе местоопределения применяется целочисленное разрешение неоднозначности псевдофазовых измерений. Это позволяет существенно сократить время получения абсолютных высокоточных координат потребителя и приблизиться к местоопределению в режиме квази-реального времени. Известно также, что при использовании процедуры целочисленного разрешения неоднозначностей результаты ВМ для подвижного потребителя значительно более стабильны, чем таковые при

использовании режима PPP. Данный режим обработки измерений в иностранной литературе получил название Integer PPP.

ВМ с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений (Integer PPP)

Стандартная модель измерений, которая соответствует обычной высокоточной ЭВИ от службы IGS, имеет следующий вид [5]:

$$\begin{cases} P_3 = \rho^j + T^j + c \, dT - dt^j + b_{P_3}^r - b_{P_3}^j + \varepsilon_{P_3}, \\ L_3 = \rho^j + T^j + c \, dT - dt^j + b_{L_3}^r - b_{L_3}^j - \lambda_3 N_3^j + \varepsilon_{L_3}; \end{cases} \Rightarrow \quad (1)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_3 = \rho^j + T^j + c \, dT_{P_3} - dt_{P_3}^j + \varepsilon_{P_3}, \\ L_3 = \rho^j + T^j + c \, dT_{P_3} - dt_{P_3}^j + A_{P_3} + \varepsilon_{L_3}; \end{cases}$$

где ρ^j - геометрическая дальность от приемника до j-го спутника, T^j - тропосферная задержка сигнала, $b_{L_3(P_3)}^r$ и $b_{L_3(P_3)}^j$ - аппаратные смещения в приемнике (r) и на j-ом спутнике (j) соответственно измерений безионосферной комбинации псевдофазы L_3 (безионосферной комбинации псевдодальности P_3), dT, dt^j - истинные смещения показаний часов приемника и j-го спутника соответственно, $\varepsilon_{P_3(L_3)}$ - шумовая ошибка измерений P_3 (L_3), $\lambda_3 = 0.006\text{м}$ - длина волны безионосферной комбинации псевдофазовых измерений, c - скорость света. В модели (1) в измерениях псевдодальности и псевдофазы используются одни и те же смещения в показаниях часов спутников $dt_{P_3}^j$ и приемников dT_{P_3} , которые имеют кодовую природу и включают в себя смещения $b_{P_3}^j$ и $b_{P_3}^r$, соответственно. В результате целочисленная неоднозначность $\lambda_3 N_3^j$ (выраженная в метрах) вбирает в себя кодовые и фазовые смещения, и в измерении псевдофазы фигурирует действительная величина неоднозначности

$$A_{P_3} = b_{L_3}^r - b_{P_3}^r - b_{L_3}^j + b_{P_3}^j - \lambda_3 N_3^j \quad (2)$$

Кодовые смещения (смещения в псевдодальности) существенно более велики и нестабильны, чем фазовые (смещения в псевдофазе). Поэтому влияние кодовых смещений

приводит к снижению точности определения действительной неоднозначности A_{P_3} (2) в измерениях псевдофазы, а значит, к снижению точности местоопределения.

В [5] описана модель измерений с разделенными часами (decoupled clock model):

$$\begin{cases} P_3 = \rho^j + T^j + c \, dT_{P_3} - dt_{P_3}^j + \varepsilon_{P_3} \\ L_3 = \rho^j + T^j + c \, dT_{L_3} - dt_{L_3}^j - \lambda_3 N_3^j + \varepsilon_{L_3} \\ A_4 = L_4 - P_6 = \frac{77L_1 - 60L_2}{17} - \frac{77P_1 + 60P_2}{137} = b_{A_4}^r - b_{A_4}^j - \lambda_4 N_4^j + \varepsilon_{A_4} \end{cases} \quad (3)$$

где A_4 - кодово-фазовая комбинация измерений Мельбурна-Вуббена, P_1 и P_2 - исходные измерения псевдодальности на частотах GPS диапазона L1 ($f_{L1}=1575.42$ МГц) и L2 ($f_{L2}=1227.6$ МГц) соответственно, $\lambda_4 N_4^j = \lambda_4 (N_1^j - N_2^j)$ - целочисленная неоднозначность (выраженная в метрах) комбинации A_4 , связывающая неоднозначности N_1^j и N_2^j исходных измерений псевдофазы L_1 и L_2 на частотах GPS диапазона L1 и L2, ε_{A_4} - шумовая ошибка измерений комбинации A_4 , $b_{A_4}^r, b_{A_4}^j$ - аппаратные смещения в измерении комбинации A_4 в приемнике и на j-ом спутнике соответственно.

В (3) вводятся отдельные показания часов для кодовых ($dT_{P_3}, dt_{P_3}^j$) и фазовых ($dT_{L_3}, dt_{L_3}^j$) измерений. Указанные отдельные показания часов вбирают в себя по отдельности немоделируемые аппаратные смещения в измерениях псевдодальности и псевдофазы, позволяя при этом считать неоднозначность N_3^j целым числом. Это позволяет в абсолютном режиме использовать для разрешения неоднозначности измерений псевдофазы хорошо разработанные поисковые процедуры, основанные на минимизации квадратичной формы в целых числах и процедуре целочисленного унимодулярного преобразования (LAMBDA-метод) [3].

Для реализации режима Integer PPP по модели (3) из сетевого решения необходимо получить величины смещений показаний спутниковых часов по коду $dt_{P_3}^j$ и по фазе $dt_{L_3}^j$, а также спутниковые смещения $b_{A_4}^j$. При этом относящиеся к приемнику смещения dT_{P_3} , dT_{L_3} и $b_{A_4}^r$ оцениваются в процессе ВМ наряду с поправками к грубым координатам пользователя. Далее приводятся результаты экспериментальных исследований по ВМ в

абсолютном режиме с целочисленным разрешением неоднозначностей псевдофазовых измерений при использовании указанных спутниковых коррекций от Министерства природных ресурсов Канады (NRCan).

Экспериментальные результаты использования целочисленного разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений при ВМ в абсолютном режиме

Был реализован фильтрационный процесс обработки системы измерений (3) на основе фильтра Калмана. Оцениваемые параметры содержали поправки к грубым координатам потребителя, некомпенсированную составляющую влажной тропосферной задержки, смещения показаний часов приемника по коду dT_{P3} , фазе dT_{L3} и смещение b_{A4}^r , а также набор целочисленных неоднозначностей N_3^j и N_4^j по всем спутникам.

Безионосферная комбинация псевдофазы L_3 хороша тем, что не содержит ионосферной ошибки. Однако длина волны, соответствующая неоднозначности N_3^j , составляет всего 6мм, что затрудняет поиск целых чисел N_3^j с учетом уровня шумов в измерениях L_3 : дисперсия шумов при образовании безионосферной комбинации возрастает почти в 9 раз. По этой причине после получения в фильтре действительной оценки неоднозначностей N_3^j и N_4^j на каждую эпоху обработки осуществляется переход к неоднозначностям исходных измерений N_1^j и N_2^j либо к неоднозначностям N_1^j и N_4^j согласно следующим выражениям:

$$\begin{cases} N_3^j = 77N_1^j - 60N_2^j = 17N_1^j + 60N_4^j \\ N_4^j = N_1^j - N_2^j \end{cases} \quad (4)$$

С учетом (4) можно записать:

$$\lambda_3 N_3^j = \lambda_3 (17N_1^j + 60N_4^j) = 17\lambda_3 N_1^j + 60\lambda_3 N_4^j, \quad (5)$$

где $17\lambda_3 = 0.107\text{м}$, что существенно повышает возможности применения поисковых процедур разрешения целочисленной неоднозначности. Длина волны λ_4 , соответствующая неоднозначности N_4^j , составляет 0.86м, что объясняет целесообразность использования в системе (3) комбинации A_4 .

Фильтрация осуществлялась на интервале измерений 2 часа 10 минут (27 измерительных эпох с интервалом 5 минут). Было реализовано два режима обработки измерений. При работе в первом режиме (Float PPP) применялась стандартная модель измерений (1), использовалась прогнозная ЭВИ (rapid) от службы IGS и осуществлялась оценка неоднозначностей как действительных чисел. При работе во втором режиме (Integer PPP) применялась модель измерений с разделенными часами (3), использовалась прогнозная ЭВИ (rapid) от службы IGS, а также спутниковые коррекции от Министерства Природных ресурсов Канады, которые были вычислены по указанной ЭВИ. Во втором режиме было реализовано разрешение целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений, т.е. на каждой эпохе обработки осуществлялась поисковая процедура минимизации соответствующей квадратичной формы в целых числах с применением целочисленного унимодулярного преобразования, которое существенно повышает вычислительную эффективность указанной поисковой процедуры [3]. При обоих режимах работы оценки координат потребителя и других параметров выдавались с интервалом 5 минут. Все параметры работы сравниваемых режимов были выбраны одинаковыми.

В данном эксперименте на протяжении всего интервала обработки использовались все доступные спутники GPS, т.е. в течение времени обработки число отслеживаемых спутников изменялось (от 7 до 10). При этом во втором режиме работы один спутник был выбран в качестве опорного, и целочисленные неоднозначности по нему не оценивались [6].

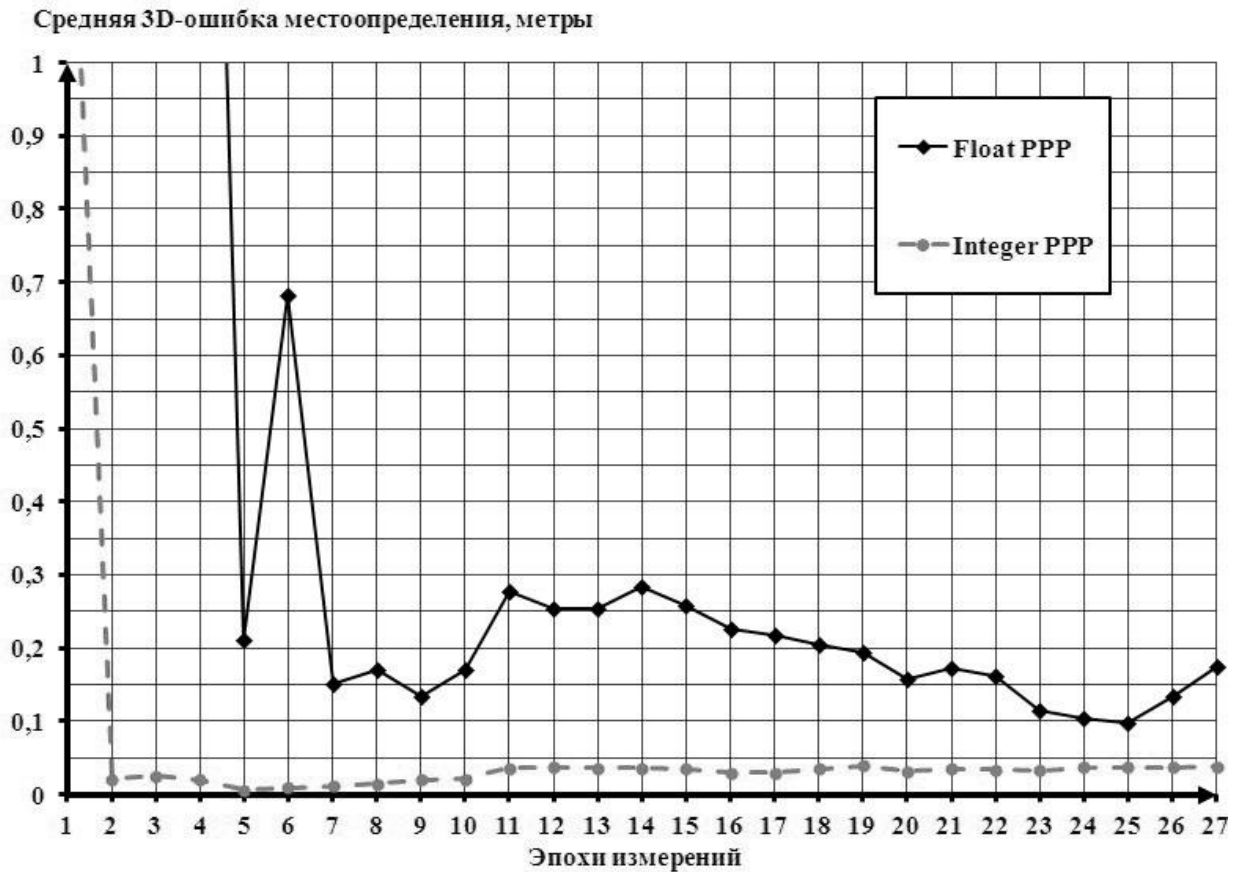


Рисунок 2. Сравнение средней 3D-ошибки местоопределения для режимов Float PPP и Integer PPP.

На рисунке 2 приведены зависимости средних 3D-ошибок [1] от времени обработки для двух описанных режимов обработки измерений (Float PPP, Integer PPP). Хорошо видно, что использование процедуры разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений существенно повышает точность местоопределения, и, что существенно более важно, в несколько раз уменьшает период сходимости).

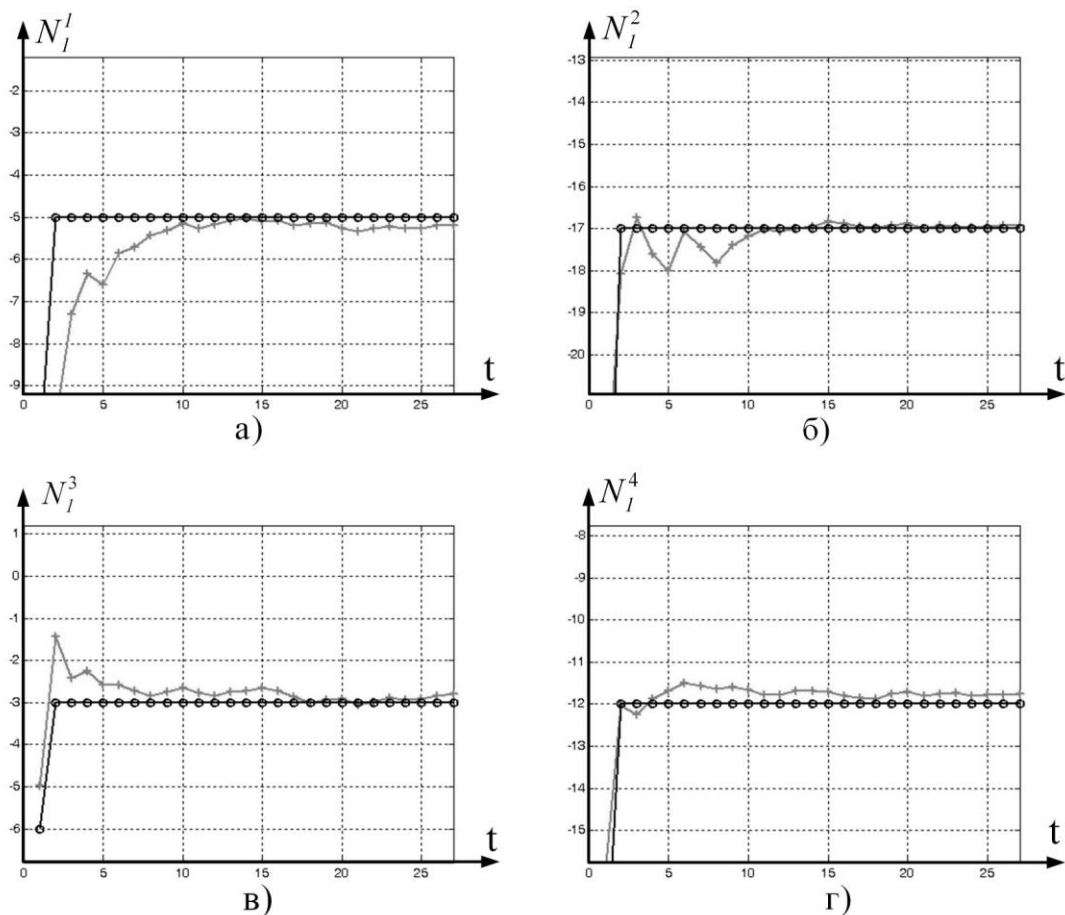


Рисунок 3. Зависимость целочисленных и действительных неоднозначностей N_I^j от времени.

На рисунке 3 приведены результаты оценивания фильтром неоднозначностей N_I^j для четырех спутников (данные спутники были видны в течение всего интервала обработки). Кривой с плюсами обозначены оцененные в фильтре действительные значения, а кривой с кружками показаны найденные целые числа после поисковой процедуры разрешения неоднозначности. Как видно, уже со второй эпохи измерений (через 5 минут после начала обработки) целые оцениваются стабильно. При этом наблюдается достаточно высокая надежность результатов процедуры разрешения – контрастное отношение (отношение двух наименьших целочисленных минимумов минимизируемой квадратичной формы) по истечении времени сходимости составляет величину 1.05-5.5. Отметим, что при аналогичных расчетах с использованием стандартных спутниковых коррекций от службы IGS (которые не предполагают целочисленную природу неоднозначностей в модели измерений) корректное и надежное разрешение неоднозначности практически невозможно.

На рисунке 4 приведены результаты оценивания фильтром неоднозначностей N_4^j для четырех спутников (данные спутники были видны в течение всего интервала обработки).

Кривой с плюсами обозначены оцененные в фильтре действительные значения, а кривой с кружками показаны найденные целые числа после поисковой процедуры разрешения неоднозначности. Хорошо видно, неоднозначности N_4^j после применения процедуры целочисленного разрешения определяются стабильно с первой эпохи обработки (кроме 2-го спутника, неоднозначности по которому определяются со второй эпохи). Существенно более стабильное разрешение неоднозначностей N_4^j объясняется длиной волны: оценке N_4^j соответствует длина волны 0.86м, а оценке N_1^j - 0.11м.

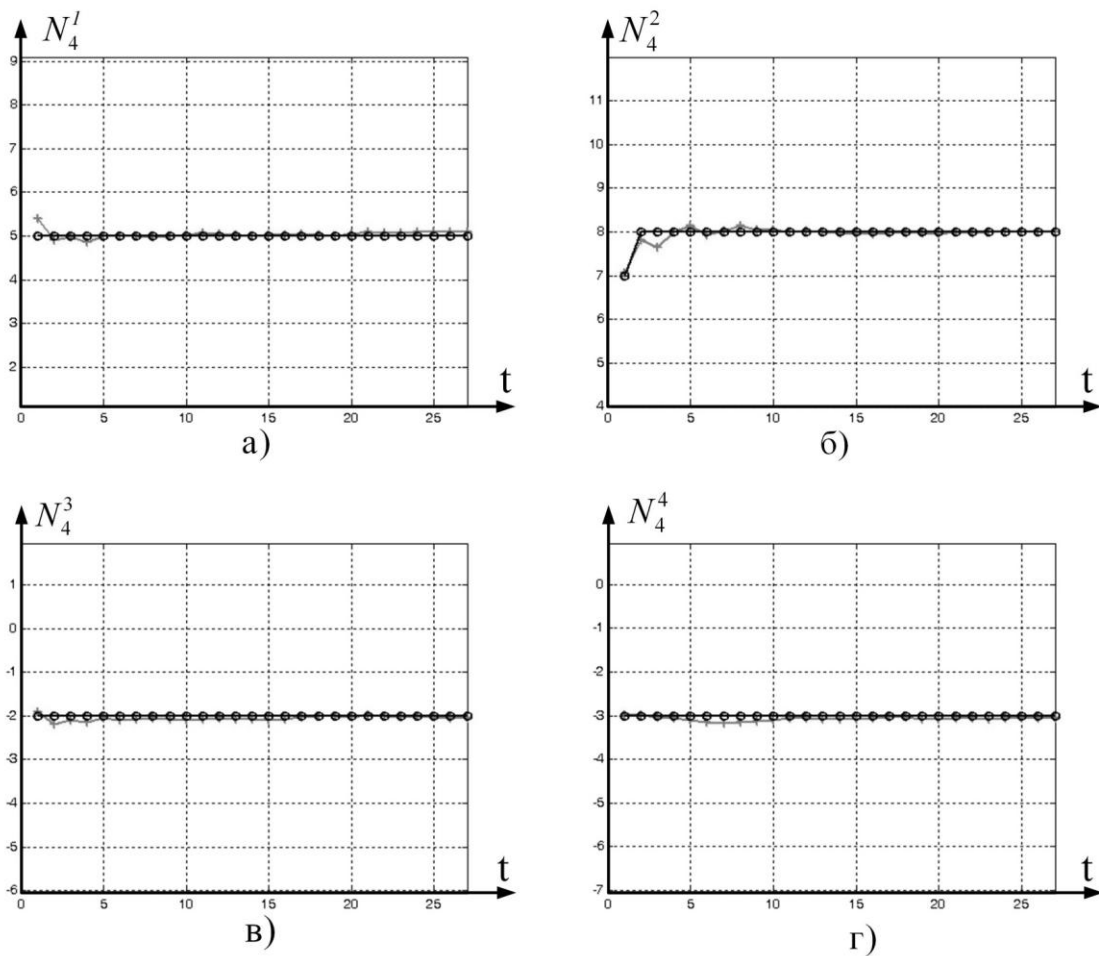


Рисунок 4. Зависимость целочисленных и действительных неоднозначностей N_4^j от времени.

Таким образом, рисунок 2 иллюстрирует существенное уменьшение периода сходимости и повышение точности местоопределения потребителя при использовании процедуры разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений. Рисунки 3-4 иллюстрируют указанную процедуру разрешения неоднозначности.

Заключение

В результате проведенных исследований проиллюстрирована возможность использования процедуры целочисленного разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений в абсолютном режиме, а также показано существенное повышение точности местоопределения и уменьшение периода сходимости для оценок 3D-ошибки местоопределения потребителя при ВМ в абсолютном режиме по сравнению со случаем использования классического ВМ (при действительных значениях неоднозначностей). Реализация процедуры целочисленного разрешения неоднозначности при ВМ в абсолютном режиме возможна лишь при наличии набора специальных спутниковых коррекций, вычисленных по сети станций. В данной работе были использованы коррекции, вычисленные Министерством природных ресурсов Канады (Geodetic Survey Division, Earth Sciences Sector, Natural Resources Canada).

В материалах статьи использованы научные результаты, полученные при выполнении НИР по Государственному контракту № 14.740.11.1265 в рамках ФЦП “Научно-педагогические кадры инновационной России”.

Библиографический список

- 1) А.Н. Подкорытов. Методы оценивания и компенсации систематических смещений в измерениях псевдодальностей и псевдофаз. Информационно-измерительные и управляющие системы. «Радиотехника», Москва. №8, т.9, 2011г. - с.23-30.
- 2) А.Н. Подкорытов. Высокоточное определение координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах с использованием уточненной эфемеридно-временной информации. Вестник Московского авиационного института. МАИ, Москва. №3, т.18, 2011г. - с.233-239.
- 3) А.А. Поваляев. Спутниковые радионавигационные системы. Время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. «Радиотехника», Москва, 2008. – 328 с.
- 4) Jan Kouba. Guide to using international GNSS service (IGS) products. Geodetic Survey Division. Natural Resources Canada. May 2009. <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/usage.html>.
- 5) Paul Collins. Isolating and Estimating Undifferenced GPS Integer Ambiguities. ION NTM 2008, 28-30 January 2008, San Diego, CA. – pp.720-732.

- 6) Paul Collins, Francois Lahaye, Pierre Heroux, Sunil Bisnath. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model. ION GNSS 21st. International Technical Meeting of the Satellite Division, 16-19, September 2008, Savannah, GA. – pp.1315-1322.

Сведения об авторах

Подкрытов Андрей Николаевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Ул. Константина Царева, 12, комн. 512, Москва, 125080; тел.: +7-926-357-32-54; e-mail: thepompous@gmail.com.